

Original Eintrag

Elektrotechnik in Einzel-Darstellungen

Herausgegeben von Dr. G. Benischke

Heft 11

DIE SELBSTTÄTIGE REGULIERUNG DER ELEKTRISCHEN GENERATOREN

VON

Dr. ing. FRIEDR. NATALIS

OBERINGENIEUR, BERLIN

MIT 75 ARBILDUNGEN IM TEXT UND AUF 4 TAFELN

Bibliothek
der
technischen Hochschule

BRAUNSCHWEIG
UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1908

Ea
227

Braunschweig

(11)

UB Braunschweig 84



10085-880-6

ELEKTROTECHNIK

IN

EINZELDARSTELLUNGEN

UNTER MITWIRKUNG HERVORRAGENDER FACHMÄNNER

HERAUSGEGEBEN VON

Dr. GUSTAV BENISCHKE

ELFTES HEFT

DIE SELBSTTÄTIGE REGULIERUNG

DER

ELEKTRISCHEN GENERATOREN

VON

Dr. ing. FRIEDR. NATALIS

OBERINGENIEUR, BERLIN

MIT 75 ABBILDUNGEN IM TEXT UND AUF 4 TAFELN

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1908

Ea-227
(11)

Albrecht Schiess
M. Schmidt

DIE
SELBSTTÄTIGE REGULIERUNG
DER
ELEKTRISCHEN GENERATOREN

VON

Dr. ing. FRIEDR. NATALIS
OBERINGENIEUR, BERLIN

57. 4524



MIT 75 ARBILDUNGEN IM TEXT UND AUF 4 TAFELN

BRAUNSCHWEIG
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN
1908

Alle Rechte,
namentlich dasjenige der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Published May 30, 1908.

Privilege of Copyright in the United States reserved under the Act
approved March 3, 1905 by Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig,
Germany.

V O R W O R T.

Die selbsttätige Regulierung der elektrischen Generatoren auf konstante Spannung wird entweder durch elektrodynamische Hilfsmittel (z. B. Kompoundierung), oder durch selbsttätige elektrische Regulierapparate bewirkt.

Die sogenannten Hilfsmittel, welche mit dem Bau und der Berechnung der Generatoren selbst eng verknüpft sind und besser im Anschluß an diese behandelt werden, sind in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, sondern nur die selbsttätigen Regulierapparate, welche die Erregung der Generatoren von außen beeinflussen und sich der jeweiligen Belastung des Netzes anpassen.

In der Literatur sind zwar Beschreibungen solcher Apparate verstreut zu finden, aber eine systematische Zusammenstellung derselben und vor allem eine mathematische Behandlung ihrer Wirkungsweise war bisher nicht vorhanden, so daß die vorliegende Arbeit in dieser Hinsicht eine Lücke ausfüllen wird.

Besondere Beachtung fanden dabei die erst neuerdings entstandenen sogenannten Schnellregulatoren, welche auch bei starken Belastungsstößen eine schnelle Beseitigung der auftretenden Spannungsschwankungen bewirken und deren Wirkungsweise bisher noch wenig geklärt war.

Ferner wurden die künstliche Kompoundierung der Generatoren sowie die erforderlichen Einrichtungen für die selbsttätige Regulierung parallel arbeitender Maschinen und

ganzer Zentralen eingehend behandelt. Auch diese Kapitel bieten ganz neue Gesichtspunkte, welche für die Praxis von erheblichem Nutzen sein werden.

Die entwickelten Formeln wurden zum größten Teil auf Beispiele in der Praxis angewendet und ihre Richtigkeit durch oszillographische Aufnahmen bestätigt.

Die vorliegende Arbeit wird somit sowohl für den projektierenden Ingenieur wie für den Besitzer oder Leiter elektrischer Anlagen und zwar besonders solcher mit stärkeren Belastungsschwankungen (Zentralen für Licht und Kraft, Industriezentralen, Bahnzentralen, elektrochemische Anlagen usw.) ein guter Wegweiser sein.

Bei den einzelnen Apparaten und Schaltungen wurde der Konstrukteur oder Erfinder nicht namentlich aufgeführt, da sich der Urheber in vielen Fällen nicht einwandfrei feststellen ließ.

Die meisten oszillographisch aufgenommenen Regulierkurven sowie einige Anregungen in der Behandlung der Schnellregulatoren stammen von Herrn Dr. A. Schwaiger, die ersten brauchbaren Anordnungen für die Regulierung parallel arbeitender Generatoren oder Zentralen von Herrn Ingenieur Chr. Ritz.

Berlin, im April 1908.

Friedrich Natalis.

INHALTSVERZEICHNIS.

	Seite
1. Die Erregung der Gleichstrom- und Wechselstrom-Generatoren für verschiedene Belastungen	1
2. Die Einteilung der selbsttätigen Regulatoren in „Träge Regulatoren“ und „Schnellregulatoren“	3
3. Die Wirkungsweise der trägen Regulatoren	3
4. Beschreibung einiger träger Regulatoren mit:	
a) Antrieb durch elektromagnetische Kuppelungen	27
1. Konstruktion Siemens u. Halske	28
2. Konstruktion der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft	29
3. Konstruktion der E.-A.-G., vorm. Lahmeyer u. Co.	30
b) Antrieb durch Klinkwerke	31
1. Konstruktion der E.-A. vorm. Schuckert u. Co.	32
2. Konstruktion Siemens u. Halske	33
3. Konstruktion Thury, Cuénod	35
4. Konstruktion Collischon	38
c) Antrieb durch Hilfsmotor	38
1. Konstruktion der E.-A. vorm. Schuckert u. Co.	39
2. Konstruktion der Siemens-Schuckertwerke	39
d) Direkt wirkende träge Regulatoren	41
1. Konstruktion Ganz u. Co. und Voigt u. Häffner	42
2. Konstruktion Dick, Österreichische Siemens-Schuckertwerke	43
5. Die Spannungsrelais	44
a) Für Gleichstrom	44
1. Konstruktion der E.-A., vorm. Schuckert u. Co.	45
2. Konstruktion Siemens u. Halske	45
b) Für Wechselstrom	47
1. Konstruktion Siemens u. Halske	47
2. Hitzdrahtrelais	48

	Seite
6. Künstliche Compoundierung der Generatoren bei Verwendung träger Regulatoren	51
7. Regulierung mehrerer parallel arbeitender Generatoren	53
a) durch mechanische Kuppelung der Regulatoren	53
b) durch elektrische Kuppelung der Regulatoren	54
c) durch teilweise Regulierung	54
d) durch getrennte Regulierung jedes Generators	55
1. Verteilung der Nutzlast bei Gleichstrom-Generatoren	58
2. Verteilung der wattlosen Last bei Wechselstrom-Generatoren	60
8. Die Schnellregulatoren	61
9. Der Schnellregulator mit Stufenschalter d. Siemens-Schuckertwerke	64
10. Der Schnellregulator mit periodisch kurz geschlossenem Erregerwiderstand, System Tirrill	72
11. Die Schnellregulatoren mit periodisch kurz geschlossenem Erregerwiderstand der Siemens-Schuckertwerke	90
12. Leistungsfähigkeit der Schnellregulatoren 10. und 11., Anordnung für parallel arbeitende Generatoren	98
13. Weitere Anwendungsgebiete der selbsttätigen Regulatoren und besonders der Schnellregulatoren	110

Die selbsttätige Regulierung der elektrischen Generatoren.

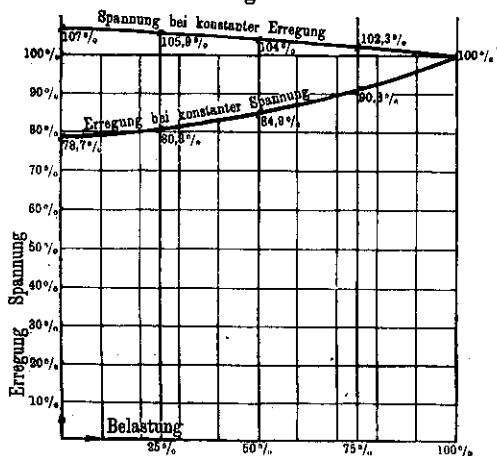
1. Die Erregung der Generatoren für verschiedene Belastungen.

Die Spannung eines Generators, möge derselbe zur Speisung eines Gleichstrom- oder Wechselstromnetzes dienen, bleibt im allgemeinen nur dann konstant, wenn sich die Belastung nicht ändert. Der Ohmsche Spannungsverlust im Generator und der Spannungsverlust durch Ankerrückwirkung wächst mit der Belastung und erfordert eine entsprechende Erhöhung des Erregerstromes, die Widerstandszunahme der Erregerwickelungen durch Temperatursteigerung eine Erhöhung der Erregerspannung. Bei Gleichstrommaschinen tritt durch die Ankerrückwirkung eine Feldverzerrung, und damit eine Verlängerung und Zusammenschnürung der Kraftlinienwege ein, welche eine Erhöhung der Erregung verlangt, wenn das Feld die gleiche Stärke behalten soll. In der gleichen Weise wirkt bei Ein- und Mehrphasen-Generatoren die Wattkomponente des Stromes Feld-verzerrend; der wattlosen Komponente dagegen, welche gegen die erstere um 90° in der Phase nacheilt, entspricht eine Stromverteilung im Anker, welche den Amperewindungen der Feldpole gerade entgegengesetzt ist und diese zu schwächen sucht. Der Spannungsabfall der Ein- und Mehrphasen-Generatoren ist daher bei induktiver Belastung im allgemeinen größer als der der Gleichstromgeneratoren. Fig. 1 zeigt die erforderliche Erregung einer Gleichstrommaschine bei verschiedener Belastung, Fig. 2 diejenige einer Drehstrommaschine bei verschiedener Belastung und bei einer Phasenverschiebung $\cos \varphi = 1,0, 0,8$ und $0,0$.

Die Regulierung der Erregung wird in der Regel bei konstanter Spannung der Erregermaschine durch Widerstände bewirkt,

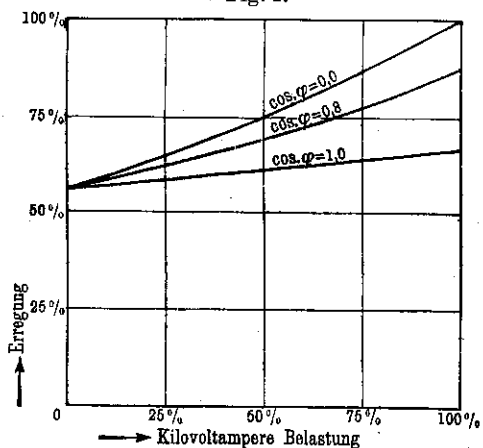
welche in den Erregerkreis des Generators eingeschaltet sind, und vielfach nur von Hand bedient werden. Bisweilen sind

Fig. 1.



auch besondere Erregermaschinen vorgesehen, deren Spannung durch Einschaltung von Widerständen in ihren Erregerkreis ¹⁾

Fig. 2.



¹⁾ Solche Erregermaschinen müssen fremd erregt werden, damit sie nicht labil werden.

verändert werden kann, so daß die Spannung durch Änderung der Erregung der Erregermaschine erfolgt.

Da die häufige Verstellung dieser Widerstände bei Belastungsänderungen große Anforderungen an die Aufmerksamkeit der Maschinisten stellen würde, so sind eine ganze Reihe von selbsttätigen Regulatoren hergestellt, welche diese Arbeit maschinell verrichten.

2. Einteilung der selbsttätigen Regulatoren.

Die selbsttätigen Regulatoren kann man einteilen in „träge Regulatoren“, das sind solche, bei denen sich der Regulierungsvorgang verhältnismäßig langsam abspielt, und in „Schnellregulatoren“, bei denen die Regulierung nahezu momentan erfolgen muß. Die erstere Art der Regulatoren ist im allgemeinen ausreichend, wenn die Belastung der Zentrale sich so langsam ändert, daß der Regulator imstande ist, die erforderliche Änderung der Erregung zu bewirken, bevor eine unzulässige Spannungsschwankung eintritt und ohne daß ein Überregulieren oder Pendeln der Spannung durch die Regulierung bewirkt wird; die letztere Art der Regulatoren muß dagegen gewählt werden, wenn plötzliche Belastungsstöße und Entlastungen im Netz auftreten, welche eine möglichst schnelle Herstellung des neuen Zustandes der Erregung der Maschine erfordern.

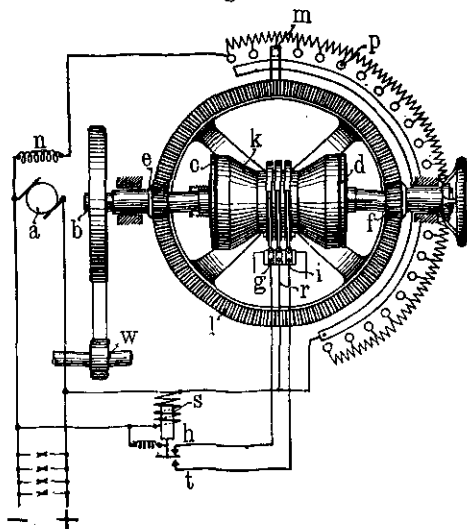
Während bei den trägen Regulatoren die Ausregulierung einer Belastungsänderung meist mehrere Sekunden (5 bis 10 Sekunden dürften etwa die Regel sein) und ein Durchlaufen des ganzen Regulierbereiches meist 30 bis 60 Sekunden erfordert, muß bei den Schnellregulatoren eine Regulierung sowohl über einen Teil wie auch über den ganzen Regulierbereich hinweg innerhalb eines Bruchteiles einer Sekunde erledigt sein, wenn er seinen Zweck erfüllen soll. Aus diesen Gründen kann auch die Wirkungsweise eines Schnellregulators nicht durch die Bedienung eines Regulators von Hand ersetzt werden.

3. Die Wirkungsweise der trägen Regulatoren.

Die trägen Regulatoren, deren verschiedene Ausführungsformen im vierten Abschnitt näher erläutert werden, bestehen aus

einem Stufenschalter, dessen Kontakthebel durch irgend eine Hilfskraft im einen oder anderen Drehsinne bewegt wird, und einem Spannungsrelais, welches diese Hilfskraft einschaltet. Diese Hilfskraft kann entweder einer umlaufenden Transmission mittels einer magnetischen Kuppelung mit Wendetriebsen oder mittels Klinkwerken entnommen, oder es können direkt Hilfsmotoren oder Magnete als Triebkraft benutzt werden. Den nachfolgenden Betrachtungen über die Wirkungsweise derartiger Regulatoren möge der Regulator mit magnetischer Kuppelung und Wendetriebsen zugrunde gelegt werden, der in Fig. 3 (schematisch) und Fig. 18

Fig. 3.

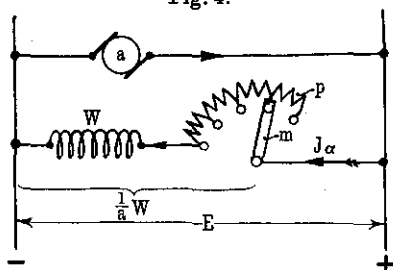


dargestellt ist. Von der ständig umlaufenden Welle *w* (Fig. 3) wird mittels Riemen die Welle *b* angetrieben. Auf *b* sitzt das Mittelteil *k* der doppelten magnetischen Kuppelung fest, während die mit den Ankerscheiben *c* bzw. *d* verbundenen konischen Zahnräder *e* bzw. *f* lose auf derselben sitzen. Das Mittelteil *k* enthält zwei Elektromagnetwickelungen, denen mittels der Schleifringe *g*, *i* der Strom zugeführt wird, während der Schleifring *r* gemeinsam für die Rückleitung dient. Durch das Spannungsrelais *s* wird bei zu hoher oder zu tiefer Spannung über Kontakt *h* bzw. *t* der linken bzw. rechten Kuppelung Strom zugeführt und dadurch das

mit e und f in Eingriff stehende große konische Rad l rechts oder links gedreht. Mit l ist schließlich der Kontaktarm m des Stufenschalters p verbunden, dessen Widerstand in den Stromkreis der Nebenschlußwicklung n eingeschaltet ist.

Jeder dauernden Stellung des Kontaktarmes Fig. 4 entspricht nun eine bestimmte Stromstärke in der Erregerwicklung. Nach

Fig. 4.



einer Verschiebung des Kontakthebels wird dagegen die der neuen Stellung entsprechende Erregung nicht augenblicklich erzeugt, sondern infolge der magnetischen Trägheit der Erregerwicklung verläuft die Zustandsänderung ganz allmählich.

Bezeichnet:

E , Volt, die Erregerspannung,

J , Amp., den maximalen Erregerstrom,

αJ , Amp., den Endwert des Erregerstromes bei vorgeschaltetem Widerstand, wobei $0 < \alpha < 1$ ist,

W , Ohm, den Widerstand der Erregerwicklung,

$\frac{1}{\alpha} W$, Ohm, den Gesamtwiderstand der Erregerwicklung + vorgeschaltetem Regulierwiderstand,

L , Henry, den Selbstinduktionskoeffizienten der Erregerwicklung, welcher näherungsweise konstant angenommen wird,

t , Sekunden, die Zeitdauer, die nach dem Beginne der Einschaltung oder einer Änderung des Erregerstromes verflossen ist,

J_α , Amp., den Strom zur Zeit t beim Gesamtwiderstand $\frac{W}{\alpha}$;

dann ist

$$J = \frac{E}{W} \quad \text{und} \quad \alpha J = \alpha \frac{E}{W} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot 1)$$

und nach der bekannten Helmholtzschen Exponentialformel¹⁾:

$$J_a = \alpha \frac{E}{W} \left(1 - e^{-\frac{W}{\alpha L} t} \right) = \alpha J \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha T}} \right) \quad . \quad . \quad 2)$$

worin $T = \frac{L}{W}$ die sogenannte Zeitkonstante der Magnetwicke-

lung allein ohne Vorschaltwiderstand und $\alpha T = \frac{\alpha L}{W}$ die Zeitkonstante der Magnetwicklung + Vorschaltwiderstand ist, das ist diejenige Zeit (in Sekunden) in welcher der Endwert J bzw. αJ erreicht würde, wenn die Stromstärke mit gleicher Geschwindigkeit, wie im ersten Moment nach der Einschaltung, anstiege, oder wenn der gleiche Spannungsüberschuß E wie zur Zeit $t = 0$ und $J_a = 0$ während einer Einschaltzeit αT vorhanden wäre.

Fig. 5 zeigt eine derartige Kurvenschar $J_a = f(\alpha, t)$ für die Werte

$$\alpha = 0; \frac{1}{4}; \frac{2}{4}; \frac{3}{4}; \frac{4}{4},$$

also für einen Stufenschalter mit vier Kontakten und für die weitere Annahme, daß

$$E = 1 \text{ Volt}, W = 1 \text{ Ohm}, L = 1 \text{ Henry}$$

ist, woraus sich $J = \frac{E}{W} = 1 \text{ Amp.}$ und $\alpha J = \alpha \text{ Amp.}$ und

¹⁾ Diese Formel entwickelt sich aus der Beziehung:

$$L \frac{dJ_a}{dt} = E - J_a \frac{W}{\alpha}$$

$$\frac{dJ_a}{\alpha \frac{E}{W} - J_a} = \frac{W}{\alpha L} dt$$

$$- \log \left(J_a - \alpha \frac{E}{W} \right) + \log C = \frac{W}{\alpha L} t$$

$$J_a = \alpha \frac{E}{W} + C e^{-\frac{W}{\alpha L} t}.$$

Da für $t = 0$ $J_a = 0$ ist, so ergibt sich:

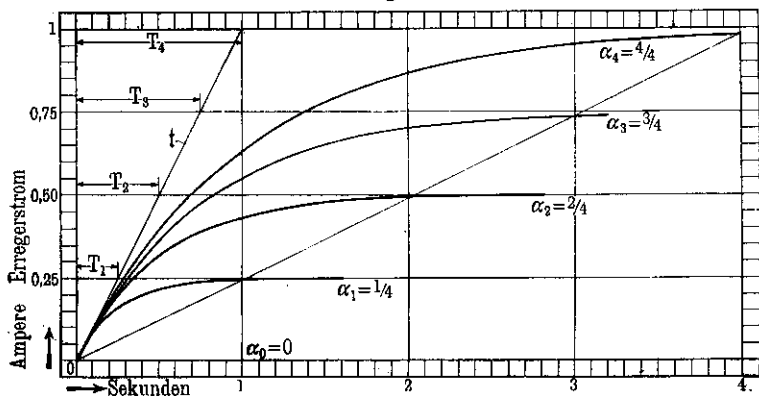
$$C = -\alpha \frac{E}{W},$$

also

$$J_a = \alpha \frac{E}{W} \left(1 - e^{-\frac{W}{\alpha L} t} \right).$$

$T = 1$ Sekunde ergibt. Da in Gleichung 2) nur die Werte $\frac{E}{W}$ und $\frac{L}{W}$, nicht aber E , W und L allein erscheinen, und da weiterhin $\alpha T = \alpha \frac{L}{W}$ die Dimension der Zeit (Sekunde) hat, so braucht man den Abszissenmaßstab nur anders zu numerieren, um beliebige Werte von $\frac{L}{W}$ und den Ordinatenmaßstab, um beliebige Werte von J bzw. $\alpha J = \frac{\alpha E}{W}$ zu erhalten. Es sind ferner

Fig. 5.



sämtliche Exponentialkurven für beliebige Werte von $\frac{\alpha E}{W}$ und $\frac{\alpha L}{W}$ einander ähnlich und teilen alle von 0 ausgehenden Strahlen im gleichen Verhältnis $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 \dots$, woraus sich eine sehr einfache Konstruktion der ganzen Kurvenschar ergibt, wenn eine Kurve bekannt ist. Die Geschwindigkeit, mit der der Strom anwächst, ergibt sich zu:

$$\frac{dJ_\alpha}{dt} = \frac{E}{L} e^{-\frac{W}{\alpha L} t} = \frac{E}{L} e^{-\frac{t}{\alpha T}} \quad \dots \quad 3)$$

für $t = 0$ ist:

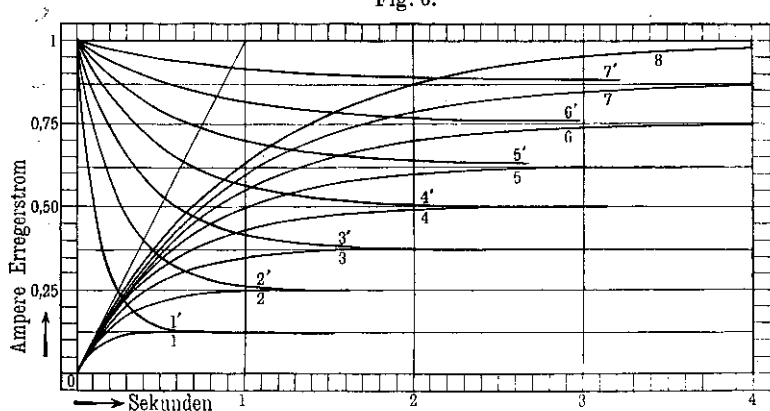
$$\frac{dJ_\alpha}{dt} = \frac{E}{L} = \frac{J}{T} = \frac{\alpha J}{\alpha T} = \text{Constans} \quad \dots \quad 4)$$

Sämtliche Stromkurven für verschiedene Werte von α , aber

gleiche Werte von $\frac{E}{W}$ und $\frac{L}{W}$, haben daher im Anfangspunkte 0 dieselbe Tangente t (Fig. 5), welche auf den betreffenden Parallelen zur Abszissenachse die Zeitkonstanten $T_4 = \frac{4}{4}$; $T_3 = \frac{3}{4}$; $T_2 = \frac{2}{4}$; $T_1 = \frac{1}{4}$ Sekunden abschneidet.

In gleicher Weise wie der Strom beim Einschalten, d. h. beim Kurzschließen von Widerstand allmählich ansteigt, fällt der Strom auch allmählich herab, wenn Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet wird. Es gehört daher zu jedem Wert von α eine ansteigende und eine abfallende Stromkurve, Fig. 6 (Darstellung für acht Kontakte).

Fig. 6.



Die Gleichung der abfallenden Stromkurve ist:

$$J'_\alpha = \alpha J + (1 - \alpha) J e^{-\frac{t}{\alpha T}} = \alpha J \left(1 + \frac{1 - \alpha}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha T}} \right)^{-1} \quad 5)$$

¹⁾ Diese Gleichung entwickelt sich in gleicher Weise wie die der ansteigenden Exponentialkurve, vgl. S. 6, Anm.:

$$J'_\alpha = \alpha \frac{E}{W} + C' e^{-\frac{W}{\alpha L} t}.$$

Zur Bestimmung der Integrationskonstante C' ist zu setzen für:

$$t = 0 \quad J'_\alpha = \frac{E}{W},$$

$$t = \infty \quad J'_\alpha = \alpha \frac{E}{W},$$

Wie aus Fig. 6 zu erkennen ist, haben die abfallenden Stromkurven eine wesentlich andere Form als die ansteigenden. Während letztere eine gemeinschaftliche Tangente im Anfangspunkte besitzen, ist dieses bei jenen nicht der Fall, denn es ist:

$$\frac{dJ'_a}{dt} = -\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{J}{T} e^{-\frac{t}{\alpha T}}$$

und für $t = 0$

$$\frac{dJ'_a}{dt} = -\frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{J}{T} \dots \dots \dots 5a)$$

also eine Funktion von α .

Einem bestimmten Wert von α entspricht ein bestimmter Kontakt des Stufenschalters p , Fig. 4; je nachdem daher der Kontakthebel m den Kontakt von rechts oder links her erreicht hat, wird der Erregerstrom auf der ansteigenden oder abfallenden Kurve verlaufen. Die Kurven für $\alpha = 0, \frac{1}{8}$ und $\frac{2}{8}$ werden allerdings eine praktische Bedeutung nicht besitzen, da der Erregerstrom bei Leerlauf stets höher als ein Viertel des Maximalerregerstromes sein wird. Die Stufenzahl der selbsttätigen Erregerregulatoren wird ferner stets eine wesentlich größere sein als 4 oder 8, denn das Spannungsintervall zwischen zwei Kontakten bei gleicher Belastung muß stets kleiner sein als die Unempfindlichkeit des Spannungsrelais, d. i. diejenige Spannungsdifferenz, die erforderlich ist, um den Kontakt h oder t (Fig. 3), herzustellen. Geschieht dieses z. B. bei ± 1 Proz. der Spannung, so sollte das Spannungsintervall zwischen zwei Kontakten des Stufenschalters bei konstanter Belastung stets kleiner sein als 2 Proz. Ist der Betrag größer, so kann ein stetes Pendeln eintreten.

Aber auch bei reichlich gewählter Kontaktzahl kann, wie später nachgewiesen wird, leicht ein Überregulieren eintreten, wenn die Reguliergeschwindigkeit zu groß gewählt wird.

woraus sich

$$C' = (1 - \alpha) \frac{E}{W}$$

und

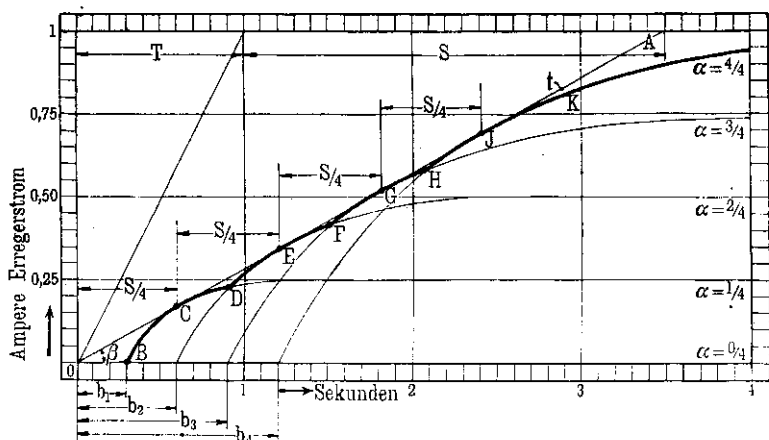
$$J'_a = \alpha \frac{E}{W} + (1 - \alpha) \frac{E}{W} e^{-\frac{W}{\alpha L} t}$$

ergibt.

Die nachfolgenden Betrachtungen über die bei dem Regulierungsvorgang auftretenden Erscheinungen und die dadurch bedingte maximale Reguliergeschwindigkeit mögen sich zunächst nur auf die ansteigenden Stromkurven beziehen.

Wir nehmen an, daß der Kontakthebel unseres vierstufigen Regulators auf dem Kontakt $\alpha = 0$ steht und sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit über die Kontakte fortbewegt. Die Umlaufgeschwindigkeit der elektromagnetischen Kuppelung sei so gewählt, daß der ganze Regulierbereich von $\alpha = 0$ bis $\alpha = 1$ von dem Kontakthebel in S Sekunden durchlaufen wird.

Fig. 7.



Dann wird für einen Stufenschalter mit vier Kontakten nach Fig. 7 der Erregerstrom innerhalb des ersten Zeitintervalles $\frac{S}{4}$ auf dem Wege BCD der Exponentialkurve für $\alpha = \frac{1}{4}$ und von da ab während des zweiten Intervalles $\frac{S}{4}$ auf der entsprechend nach rechts verschobenen Kurve für $\alpha = \frac{2}{4}$ bis F folgen. Der Erregerstrom steigt somit nach dem Kurvenzuge $B, C, D, E, F, G, H, J, K$. Würde die Stufenzahl unendlich groß sein, so wäre statt des gebrochenen Linienzuges $BCDEF \dots$ die Hüllkurve der sämtlichen Exponentialkurven zu setzen. Es soll nun im folgenden bewiesen werden, daß die ansteigenden

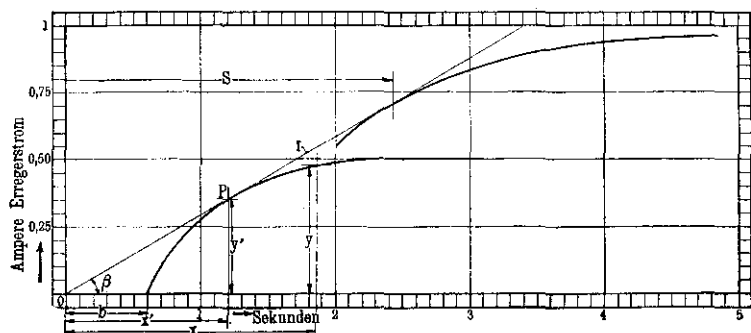
Exponentialkurven eine gemeinschaftliche von 0 ausgehende Tangente besitzen, welche daher auch die Hüllkurve ist, und daß somit der Erregerstrom linear mit der Bewegung des Kontakthebels steigt, vorausgesetzt, daß die Abstufung der Erregerwiderstände so vorgenommen ist, daß α von Stufe zu Stufe linear zunimmt.

Der Beweis soll zunächst indirekt geführt werden. Es sei in Fig. 8 die Tangente t gegeben, welche mit der Abszissenachse den Winkel β bildet, so daß

$$\operatorname{tg} \beta = A \quad \dots \quad 6)$$

ist.

Fig. 8.



Setzt man in Gleichung 2) für die im Anfangspunkte 0 entspringende Exponentialkurve:

$$J_u = \alpha J (1 - e^{-\frac{t}{\alpha T}}),$$

$$J_u = y \quad \text{und} \quad t = x - b,$$

so erhält man die Gleichung der um die Strecke b nach rechts verschobenen Kurve

$$y = \alpha J (1 - e^{-\frac{x-b}{\alpha T}}) \quad \dots \quad 7)$$

Soll die Kurve die Tangente t im Punkte x', y' berühren, so ist:

$$\frac{dy'}{dx'} = \frac{J}{T} e^{-\frac{x'-b}{\alpha T}} = \frac{y'}{x'} = A \quad \dots \quad 8)$$

ferner ist nach Gleichung 7):

$$e^{-\frac{x'-b}{\alpha T}} = 1 - \frac{y'}{\alpha J},$$

daher entsteht aus Gleichung 8):

$$A = \frac{J}{T} \left(1 - \frac{y'}{\alpha J} \right); \quad \frac{y'}{\alpha} = J - A T \quad \dots \quad 9)$$

ferner geht aus Gleichung 8) hervor:

$$\frac{x'-b}{\alpha} = -T \log \frac{A T}{J} \quad \dots \quad 10)$$

und aus Gleichung 8), 9) und 10):

$$\begin{aligned} x' &= b - \alpha T \log \frac{A T}{J} = \frac{y'}{A} = \alpha \frac{J - A T}{A}, \\ \frac{x'}{\alpha} &= \frac{J - A T}{A} \quad \dots \quad 11) \end{aligned}$$

und aus Gleichung 10) und 11):

$$\frac{b}{\alpha} = \frac{J - A T}{A} + T \log \frac{A T}{J} \quad \dots \quad 12)$$

Für die ganze die Tangente t berührende Kurvenschar mit den Koeffizienten $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots b_1, b_2, b_3 \dots$ erhält man:

$$\frac{y'_1}{\alpha_1} = \frac{y'_2}{\alpha_2} = \frac{y'_3}{\alpha_3} \dots = J - A T = \text{Constans} \quad \dots \quad 9a)$$

$$\frac{x'_1}{\alpha_1} = \frac{x'_2}{\alpha_2} = \frac{x'_3}{\alpha_3} \dots = \frac{J - A T}{A} = \text{Constans} \quad \dots \quad 11a)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_1}{\alpha_1} &= \frac{b_2}{\alpha_2} = \frac{b_3}{\alpha_3} \dots = \frac{J - A T}{A} + T \log \frac{A T}{J} \\ &= \text{Constans} \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad 12a)$$

Aus Gleichung 11a) folgt weiter:

$$(x'_2 - x'_1) : (x'_3 - x'_2) : (x'_4 - x'_3) \dots = (\alpha_2 - \alpha_1) : (\alpha_3 - \alpha_2) : (\alpha_4 - \alpha_3) \dots$$

Da aber nach der früheren Annahme der Stufenschalter nach gleichen Intervallen für α abgestuft sein soll, so ist:

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \alpha_3 - \alpha_2 = \alpha_4 - \alpha_3 = \dots$$

und

$$x'_2 - x'_1 = x'_3 - x'_2 = x'_4 - x'_3 = \dots$$

Es ist somit bewiesen, daß bei linearer Änderung von α zum Durchlaufen der Wege CDE , EFG , GHJ (Fig. 7) dieselben Zeiten, nämlich die Projektionen dieser Strecken auf die X-Achse, d. i. je $\frac{S}{4}$ Sekunden erforderlich sind. Es war aber zu beweisen, daß zum Durchlaufen der Wege BCD , DEF , $F GH$, HJK dieselben Zeiten, nämlich je $\frac{S}{4}$ erforderlich sind. Dieses ist für eine unendlich große Stufenzahl auch der Fall, da drei unendlich benachbarte Kurven in C , E , G gleiche Krümmungsradien besitzen und daher die unendlich kleinen Bogen-dreiecke CDE und EFG , von Differentialen höherer Ordnung abgesehen, kongruent sind¹⁾. Für eine endliche Stufenzahl kann man mit großer Annäherung dieselbe Annahme machen, da schon bei der äußerst geringen Zahl von vier Stufen meßbare Differenzen sich nicht ergeben.

¹⁾ Für eine unendlich große Stufenzahl läßt sich der Beweis auch direkt in folgender Weise führen:

Die Gleichung der Exponentialkurven, Fig. 8, ist:

$$y = \alpha J \left(1 - e^{-\frac{x-b}{\alpha T}}\right),$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{J}{T} e^{-\frac{x-b}{\alpha T}} = \frac{J}{T} \left(1 - \frac{y}{\alpha J}\right).$$

Die Gleichung der Hüllkurve sei:

$$y' = f(x').$$

Die Hüllkurve hat mit den einzelnen Exponentialkurven am jeweiligen Berührungspunkt P die Ordinaten $x' = x$ und $y' = y$ sowie die Bahnelemente $dx' = dx$ und $dy' = dy$ gemeinsam.

Da nun nach der Voraussetzung dx' proportional $d\alpha$ sein soll, so steigen:

x' von 0 bis S

und

α von 0 bis 1

proportional an, so daß

$$x' = \alpha S$$

ist und am Berührungspunkt P :

$$dy' = dy = \frac{J}{T} \left(1 - \frac{y}{\alpha J}\right) dx,$$

$$\frac{dy'}{dx'} = \frac{J}{T} \left(1 - \frac{y'}{x'} \frac{S}{J}\right).$$

Es ist daher umgekehrt anzunehmen, daß bei gleichförmiger Bewegung des Kontakthebels (Fig. 4) die Erregerstromstärke linear ansteigt.

Nach Gleichung 11 a) ist:

$$x'_2 = \alpha_2 \frac{J - AT}{A}; \quad x'_1 = \alpha_1 \frac{J - AT}{A}$$

$$x'_2 - x'_1 = (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{J - AT}{A}.$$

Setzen wir hierin $x'_2 - x'_1 = \frac{S}{4}$ und $\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{1}{4}$, so ist:

$$S = \frac{J - AT}{A} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \beta = A = \frac{J}{S + T} \quad ^1) \quad . \quad 13)$$

Ferner ist nach Gleichung 12 a):

$$\left. \begin{aligned} b_2 - b_1 &= (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{J - AT}{A} + T \log \frac{AT}{J} \right) \\ &= (\alpha_2 - \alpha_1) \left(S + T \log \frac{T}{S + T} \right) \end{aligned} \right\} . \quad 14)$$

Bezeichnen wir mit n die Stufenzahl, so ist:

$$\frac{1}{n} = \alpha_2 - \alpha_1; \quad n = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

Dieser Gleichung wird genügt durch die Gerade:

$$y' = Ax',$$

$$\frac{y'}{x'} = A = \frac{dy'}{dx'},$$

wenn

$$A = \frac{J}{T} \left(1 - A \frac{S}{J} \right) = \frac{J}{S + T}$$

ist.

¹⁾ Die Rechnung stützt sich auf die Annahme, daß der Widerstand nach gleichen Intervallen von a abgestuft ist. Weicht man hiervon ab, so wird die Hüllkurve mehr oder weniger bogenförmig verlaufen. Vielfach wird z. B. auch der Regulator nach gleichen Intervallen des Widerstandes abgestuft. In diesem Falle verläuft die Stromkurve zunächst flacher und zum Schlusse steiler. Während aber im ersteren Falle die Spannungskurve des Regulators infolge der magnetischen Sättigung als Funktion von J ein Knie besitzt, verläuft sie im letzteren Falle als Funktion von W mehr geradlinig.

also
$$b_2 - b_1 = \frac{1}{n} \left(S + T \log \frac{T}{S+T} \right) \cdot \cdot \cdot \cdot 14a)$$

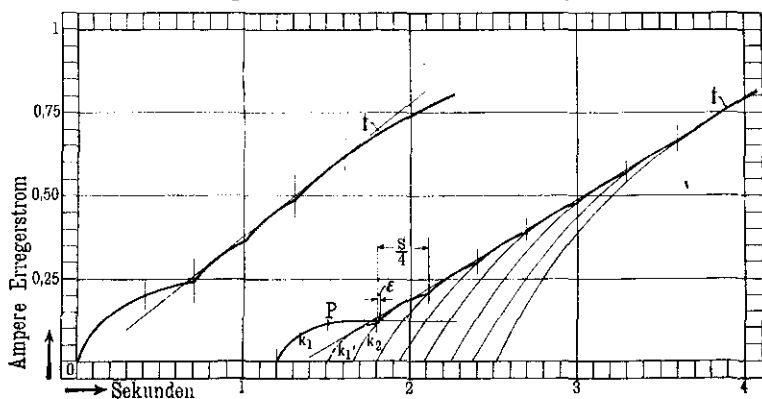
Die sämtlichen Exponentialkurven werden aber nur dann eine gemeinschaftliche Tangente haben, wenn die erste Kurve für $\alpha = \frac{1}{4}$ bzw. $\frac{1}{n}$ in einem Punkte B beginnt, dessen Abstand von 0

$$b_1 = \alpha_1 \left(S + T \log \frac{T}{S+T} \right) = \frac{1}{n} \left(S + T \log \frac{T}{S+T} \right) \text{ ist.}$$

Liegt der Punkt D nicht um $\frac{S}{4}$ bzw. $\frac{S}{n}$ hinter B , so kann nicht mehr angenommen werden, daß die Kurven eine gemein-

Fig. 9 a.

Fig. 9 b.



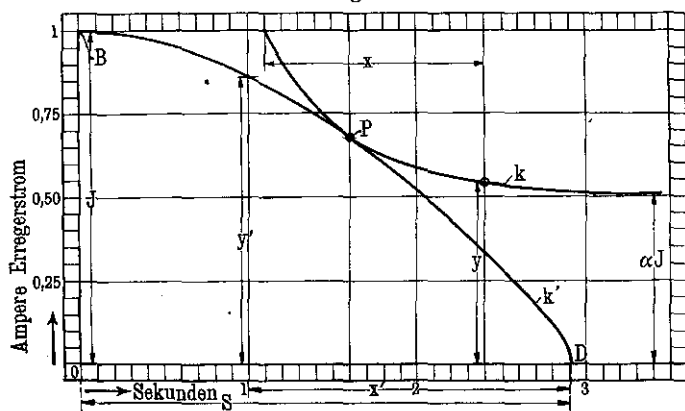
schaftliche Tangente besitzen. Es zeigt sich aber, wie Fig. 9a für einen vierstufigen und Fig. 9b für einen achtstufigen Stufenschalter darstellt, daß lediglich die erste Kurve, auf der die Regulierung an einem ganz beliebigen Punkte P beginnen möge, aus dem Rahmen der übrigen herauszutreten scheint, denn alle übrigen Kurven nähern sich stark asymptotisch der Tangente t . Verschieben wir in Fig. 9b die Kurve k_1 nach k'_1 , so erkennen wir auch den Fehler, welchen wir bei der Annahme machen, daß alle Kurven eine gemeinsame Tangente besitzen. Die Kurven k_1 und k'_1 schneiden die Kurve k_2 in zwei Punkten, welche um das kleine Zeitelement ϵ differieren. Um diesen Betrag ϵ haben wir das Zeitintervall $\frac{S}{n}$, während welchem k_2 durchlaufen wird, zu

kurz angenommen. Wir können daher im allgemeinen annehmen, daß die Spannung nach jeder Störung, genügend große Stufenzahl vorausgesetzt, geradlinig unter einem Winkel β ,

$\operatorname{tg} \beta = \frac{J}{S + T}$, verläuft und daß lediglich die erste und die letzte Kurve hiervon abweichen. Die letzte Kurve nach Aufhören der Störung, d. h. nach Unterbrechung der Relaiskontakte und Stillstand des Kontakthebels zweigt nämlich, wie Fig. 9a und 9b zeigt, von der Tangente ab und verläuft nach der dem Kontakt entsprechenden ansteigenden Exponentialkurve.

Es ist jedoch zu beachten, daß die ansteigenden Exponentialkurven nur dann eine gemeinsame Tangente haben, wenn der Kontakthebel im Sinne einer Vergrößerung von α sich bewegt, nicht aber bei fallendem Werte von α (vgl. Fig. 12).

Fig. 10.



Wir wollen nunmehr den Verlauf der Hüllkurve k' der abfallenden Exponentialkurven k bei fallenden Werten von α und unendlich großer Stufenzahl untersuchen (Fig. 10).

Die Scheitelpunktsgleichung der fallenden Exponentialkurven ist nach Gleichung 5):

$$y = \alpha J + (1 - \alpha) J e^{-\frac{x}{\alpha T}} \quad 16)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{J}{T} e^{-\frac{x}{\alpha T}} = -\frac{y - \alpha J}{\alpha T} \quad . . . 17)$$

Ist ferner $y' = f(x')$ die Gleichung der Hüllkurve, so fallen die Werte

und x' von S bis 0

α von 1 bis 0

proportional, es ist daher:

$$\alpha = \frac{x'}{S} \quad \dots \quad 18)$$

In dem Berührungspunkte P der Kurven k und k' haben dieselben die Ordinaten

$$y' = y$$

und die Bahnelemente

$$dx' = -dx \quad \text{und} \quad dy' = dy$$

gemeinsam. Daher ist:

$$\frac{dy'}{dx'} = \frac{y' - \alpha J}{\alpha T} = \frac{y'}{\alpha T} - \frac{J}{T} = \frac{y'}{x' T} - \frac{J}{T} \quad \dots \quad 19)$$

Wäre die Kurve k' eine Gerade, so könnte nur $\frac{y'}{x'} = \frac{J}{S}$ sein, da sie durch die Punkte B und D gehen muß, dann wäre aber $\frac{dy'}{dx'} = \frac{J}{T} - \frac{J}{T} = 0$. Dieser Fall ist daher nur denkbar, wenn $S = \infty$ ist. Gleichung 19) ist eine homogene Differentialgleichung. Setzen wir $\frac{y'}{x'} = z$,

$$dy' = z dx' + x' dz; \quad \frac{dy'}{dx'} = z + x' \frac{dz}{dx'},$$

$$z + x' \frac{dz}{dx'} = z \frac{S}{T} - \frac{J}{T},$$

$$\frac{dx'}{x'} = \frac{dz}{z \frac{S-T}{T} - \frac{J}{T}} = \frac{T}{S-T} \frac{d(-z)}{\frac{J}{S-T} - z};$$

$$\log \frac{x'}{C} = \frac{T}{S-T} \log \left(\frac{J}{S-T} - z \right);$$

$$\frac{x'}{C} = \left(\frac{J}{S-T} - z \right)^{\frac{T}{S-T}} = \left(\frac{J}{S-T} - \frac{y'}{x'} \right)^{\frac{T}{S-T}},$$

für $x' = S$ ist $y' = J$, daher

$$\begin{aligned} \frac{S}{C} &= \left(\frac{J}{S-T} - \frac{J}{S} \right)^{\frac{T}{S-T}}; \quad C = S \left(\frac{S(S-T)}{JT} \right)^{\frac{T}{S-T}}; \\ x' &= S \left(\frac{S}{T} - \frac{S(S-T)}{JT} \frac{y'}{x'} \right)^{\frac{T}{S-T}}; \\ y' &= \frac{JT}{S(S-T)} x' \left[\frac{S}{T} - \left(\frac{x'}{S} \right)^{\frac{S-T}{T}} \right] \\ y' &= \frac{J}{S-T} \left[x' - T \left(\frac{x'}{S} \right)^{\frac{S}{T}} \right] \end{aligned} \quad \dots \quad 20)$$

Diese Gleichung ist für alle Werte von $\frac{S}{T}$ mit Ausnahme des Wertes $\frac{S}{T} = 1$ verwendbar.

Für $\frac{S}{T} = 1$ ist

$$y' = \frac{J \left[x' - T \left(\frac{x'}{S} \right)^{\frac{S}{T}} \right]}{S-T} = \frac{0}{0}, \text{ also unbestimmt.}$$

In diesem Falle ist zu setzen:

$$y' = \frac{\varphi(S)}{\psi(S)} = \frac{\varphi'(S)}{\psi'(S)}$$

$$y' = -JT \left(\frac{x'}{S} \right)^{\frac{S}{T}-1} \left(\frac{x'}{ST} \log \frac{x'}{S} - \frac{S}{T} \frac{x'}{S^2} \right);$$

$$y' = J \left(\frac{x'}{S} \right)^{\frac{S}{T}} \left(1 - \log \frac{x'}{S} \right) = J \frac{x'}{S} \left(1 + \log \frac{S}{x'} \right) \quad 20a)$$

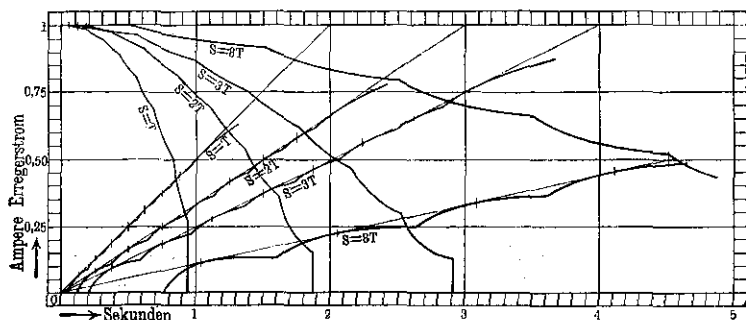
Diese Formel gilt aber nur für den Wert $S = T$.

In Fig. 11 sind mehrere Kurvenzüge für die ansteigenden und abfallenden Exponentialkurven und zwar für $S = 1T, 2T, 3T, 8T$ dargestellt. Dieselben zeigen, daß die abfallenden Hüllkurven in ihrem unteren Teile und besonders für kleine Werte von S steiler abfallen als die ansteigenden. Da aber, wie später gezeigt wird, S meist größer zu wählen ist als $8T$, und da ferner nur die oberen Hälften der Hüllkurven für $\alpha = 0,5$ bis

1,0 in Frage kommen, so haben die abfallenden Hüllkurven in diesem Bereiche praktisch stets ein sanfteres Gefälle als die ansteigenden.

Bei den vorstehenden Rechnungen hatten wir angenommen, daß der Selbstinduktionskoeffizient L konstant ist. Diese Annahme ist zum mindesten während eines kleinen Regulierbereiches zulässig. Wir wollen bei den weiteren Erörterungen ferner annehmen, daß die Maschinenspannung proportional dem Erregerstrom oder wenigstens linear mit ihm wächst, daß also die Charakteristik der Maschine geradlinig verläuft. Dieses ist, streng genommen, nicht zulässig. Doch kann man wohl annehmen, daß sich die Maschinenspannung während eines kleinen Regulierbereiches, wenn auch nicht proportional, so doch linear mit der

Fig. 11.



Erregerstromstärke ändert. Das bedeutet aber, daß die Exponentialkurven für die Erregerströme gleichzeitig als Spannungskurven der Maschine bei entsprechend verschobener Abszissenachse aufgefaßt werden können und daß auch die Maschinenspannungen bei steigendem Werte von α nach der Tangente t (Fig. 7) anwachsen. Wir können daher bei einem geradlinigen Verlauf der Erregerströme auch einen geradlinigen Verlauf der Maschinenspannung erwarten und wollen nunmehr den Verlauf der Regulierung an Hand der Fig. 12 verfolgen:

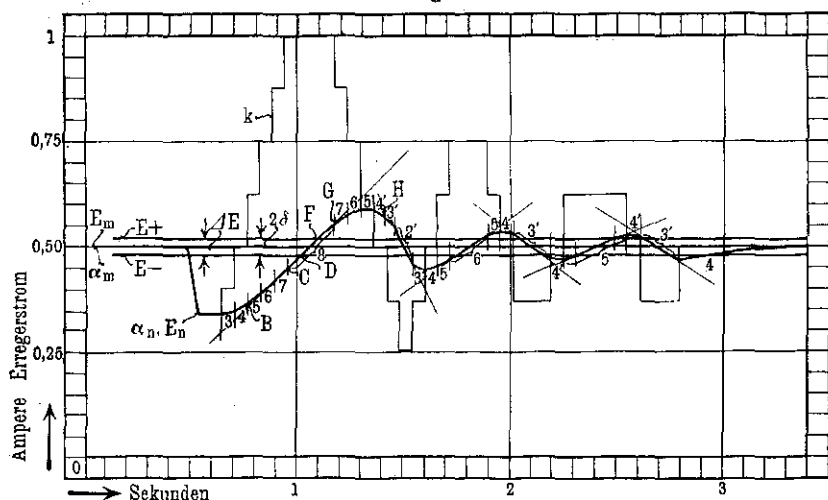
Die mittlere Maschinenspannung, welche konstant gehalten werden soll, sei E_m ; dem Wert E_m entspricht bei einer bestimmten Belastung, z. B. bei Leerlauf, ein bestimmter Regulierkontakt, der durch den Wert α_m gegeben ist. Das Relais möge einen Un-

empfindlichkeitsgrad $\angle E$ besitzen, dann entspricht auch diesem Wert $\angle E$ ein Wert $\angle \alpha = 2\delta$. Fällt nun infolge eines Belastungsstoßes die Spannung von E_m auf E_n , so kann man den Vorgang auch so auffassen, als ob durch die erhöhte Ankerückwirkung die Erregung auf einen Betrag herabgedrückt wäre, der dem Wert α_n und dem Endwert $\alpha_n J$ der zugehörigen Exponentialkurve entspricht. Nehmen wir einen Stufenschalter mit acht Kontakten (Fig. 6) an, und ist in Fig. 12 $\alpha_m = \frac{4}{8}$ und $\frac{2}{8} < \alpha_n < \frac{8}{8}$, so wird nach Einschalten der magnetischen Kuppelung durch das Relais die Erregerstromstärke bzw. die Maschinen-spannung zunächst nach Kurve 3 (entsprechend $\alpha = \frac{8}{8}$) während $\frac{S}{8}$ Sekunden steigen. In den weiteren Zeitintervallen von je $\frac{1}{8} S$ Sekunden steigt die Spannung nach Kurve 4, 5, 6, 7, 8. Sobald die Spannungskurve die Linie E in D schneidet, schaltet das Relais die Kuppelung aus, so daß der Kontakthebel stehen bleibt. Die Spannung steigt aber weiter nach Kurve 8, entsprechend $\alpha = \frac{8}{8}$, zunächst bis F . In diesem Moment schaltet das Relais die andere Hälfte der Kuppelung ein, so daß sich der Kontakthebel in rückläufigem Sinne bewegt. Dabei wird sich aber der Kontakthebel während einer Zeit FG noch auf Kontakt 8 befinden, welche genau so groß ist, als die Zeit CD . Vom Punkte G an wird in Zeitintervallen von je $\frac{1}{8} S$ Sekunden die Spannung nach 7, 6, 5 steigen. Während aber die Spannung von B bis D wesentlich geradlinig anstieg, verläuft sie von D ab nach einer gekrümmten Linie. Bis zum Punkte H folgte ferner die Spannung den ansteigenden Exponentialkurven, da aber der Punkt H über dem nächstfolgenden Wert von $\alpha = \frac{4}{8}$ liegt, so wird die Spannung nunmehr nach den abfallenden Exponentialkurven 4', 3', 2', 3' verlaufen usw.¹⁾ Die Bewegung des Kontakthebels ist durch die treppenförmige Kurve k dargestellt. Die Bewegung des Kontakthebels selbst ist zwar eine gleichförmige, die Darstellung als Treppe soll aber gleichzeitig die Zeitintervalle angeben, in denen derselbe Kontakt und daher dieselbe Exponentialkurve (α) in Frage kommt. Fig. 12 zeigt, daß die Regulierung sechsmal über das Ziel hinausschießt, d. h. daß ein mehrmaliges Überregu-

¹⁾ Daß die Spannung in Fig. 12, entgegen den früheren Auseinandersetzungen, steiler abfällt als ansteigt, ist dadurch begründet, daß der Wert von S sehr klein ($S = T$) angenommen wurde.

lieren eintritt, ehe wieder die Spannung innerhalb der Unempfindlichkeit des Relais stationär wird. Ein derartiges Überregulieren ist aber äußerst unangenehm und besonders bei Lichtbetrieb unerträglich. Man muß daher die Geschwindigkeit des Regulierungsvorganges so verlangsamen, daß bei einer Belastungszunahme die ansteigende Spannungskurve die obere Spannungsgrenze E_+ und bei einer Belastungsabnahme die abfallende Spannungskurve die untere Spannungsgrenze E_- nicht schneidet. Die Bedingungen unter denen dieses geschieht, mögen an der Hand der Fig. 13 ermittelt werden. Die Spannung E_m sei wie in Fig. 12 durch

Fig. 12.



eine Belastungszunahme auf den Wert E_n gefallen. Der Einfluß der erhöhten Belastung und der damit verbundenen Ankerrückwirkung sei daher gleichbedeutend mit einer Verminderung der Erregung von dem Werte $\alpha_m J$ auf den Wert $\alpha_n J$. Der Unempfindlichkeit $\angle E$ des Relais entspreche ferner eine Differenz im Erregerstrom von $2 \delta J$. Setzen wir $J = 1$, so sind die obigen Erregerströme durch die Werte α_m , α_n , 2δ gegeben. Ebenso sind die Spannungen, die während des Regulierbereiches linear mit den Erregerströmen wachsen mögen, wenn der konstante Wert x die Verschiebung der Abszissenachse für die Spannung angibt:

$E_m = (\alpha_m + \kappa) E$; $E_n = (\alpha_n + \kappa) E$; $\Delta E = 2 \delta E$,
oder für

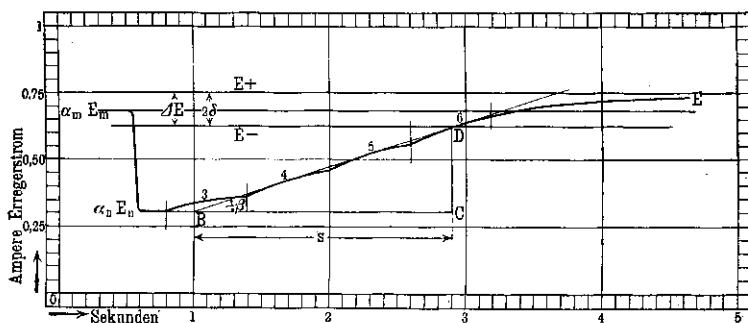
$$E = 1; \quad E_m = \alpha_m + \kappa; \quad E_n = \alpha_n + \kappa; \quad \Delta E = 2 \delta.$$

Wie früher erörtert, steigt nach Beginn der Regulierung die Spannung von B bis D geradlinig an. Und zwar ist nach Gleichung 13)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta = A = \frac{J}{S+T} = \frac{CD}{BC} = \frac{(\alpha_m - \alpha_n - \delta) J}{s}, \\ s = (\alpha_m - \alpha_n - \delta) (S + T) \dots \dots \dots 21) \end{aligned}$$

Nun sollte nach der Definition S diejenige Zeit sein, in der der Regulator sämtliche Kontakte entsprechend $\alpha = 0$ bis $\alpha = 1$

Fig. 13.



durchläuft, so daß die Maximalwerte des Erregerstromes sich in dieser Zeit von 0 bis J ändern, folglich werden sich die Maximalwerte des Erregerstromes in s Sekunden um $\frac{s}{S} J$ oder nach

Gleichung 21) um $\frac{S+T}{S} (\alpha_m - \alpha_n - \delta) J$ ändern.

In der Zeit s hat sich somit auch der Faktor α um den Betrag $\frac{S+T}{S} (\alpha_m - \alpha_n - \delta)$ vergrößert.

Da aber der Anfangswert von α α_n war, so ist der Faktor der letzten Exponentialkurve, welche in D die Linie E_- schneidet:

$$\alpha_n + \frac{S+T}{S} (\alpha_m - \alpha_n - \delta).$$

Vom Punkte D an steigt der Erregerstrom und die Erregerspannung nicht mehr geradlinig, sondern nach der Exponentialkurve DE . Soll der Maximalwert der Spannung den Wert E_+ nicht überschreiten, so muß daher

$$\alpha_n + \frac{S+T}{S} (\alpha_m - \alpha_n - \delta) \leq \alpha_m + \delta$$

sein.

$$(\alpha_m - \alpha_n) \left(\frac{S+T}{S} - 1 \right) \leq \left(\frac{S+T}{S} + 1 \right) \delta,$$

$$\alpha_m - \alpha_n \leq \delta \frac{2S+T}{T} \quad \dots \quad 22)$$

$$S \geq \frac{T}{2} \left(\frac{\alpha_m - \alpha_n}{\delta} - 1 \right) = \frac{1}{2} \frac{L}{W} \left(\frac{\alpha_m - \alpha_n}{\delta} - 1 \right) \quad 23)$$

Es erübrigt sich, dieselben Erwägungen auch für die abfallende Hüllkurve anzustellen. Denn einerseits sind die plötzlichen Belastungszunahmen meist erheblich größer als die Belastungsabnahmen, andererseits ist die abfallende Hüllkurve in dem in Frage kommenden Teile meist sehr flach, so daß ein Überregulieren nach einer Belastungsabnahme weniger zu befürchten ist als nach einer Zunahme.

Der Gleichung 23) müssen alle trägen Regulatoren entsprechen, wenn sie nicht überregulieren sollen. Es muß aber weiterhin gefordert werden, daß eine neue Belastungsänderung, von selteneren Ausnahmen abgesehen, nicht eher auftritt, als die vorhergehende ganz oder nahezu ausreguliert ist. Zwischen zwei Belastungsschwankungen soll daher nach Gleichung 21) ein Zeitunterschied von

$$\begin{aligned} s &\geq (\alpha_m - \alpha_n - \delta) (S + T) \\ s &\geq (\alpha_m - \alpha_n - \delta) \frac{\alpha_m - \alpha_n + \delta}{\delta} \frac{T}{2}, \\ s &\geq \frac{(\alpha_m - \alpha_n)^2 - \delta^2}{\delta} \frac{T}{2} \quad \dots \quad 24) \end{aligned}$$

liegen.

Registriert man die Spannung der Zentrale, so kann man nach der Größe der Schwankungen und der Häufigkeit ihres Aufeinanderfolgens sich an Hand der Gleichungen 23) und 24)

wohl ein Urteil darüber bilden, ob die Verwendung eines trägen Regulators noch zulässig oder ob ein Schnellregulator zu wählen ist.

Besonders schädlich wirkt es, wenn auf eine Belastungszunahme innerhalb der Regulierzeit s eine Belastungsabnahme erfolgt, während eine zweite Belastungszunahme weniger schädlich ist, da die Spannung infolge der nach der ersten Belastungszunahme einsetzenden Regulierung eine ansteigende Tendenz hat.

Die aufgestellten Formeln mögen schließlich auf einige Beispiele aus der Praxis Anwendung finden:

Bei einer größeren achtpoligen Gleichstrom-Außenpolmaschine von Siemens & Halske für 220 Volt, 1830 Amp., 400 Kilowatt, 170 Touren pro Minute, Schenkelwiderstand 4,5 Ohm, maximaler Erregerstrom 40 Amp. wurden folgende Werte gemessen:

Belastung	Erregung Ampere	α	Selbstinduktion L (Henry)	Zeitkonstante $T = L/W$ (Sekunden)
0	29,4	0,785	21,8	4,7
$\frac{1}{4}$	30,3	0,810	20,8	4,6
$\frac{2}{4}$	32,0	0,853	20,0	4,4
$\frac{3}{4}$	34,0	0,907	19,2	4,3
$\frac{4}{4}$	37,5	1,000	18,0	4,0

Nehmen wir nun einen Belastungsstoß von $\frac{2}{4}$ auf $\frac{4}{4}$ Last an und setzen $2\delta = 1$ Proz. $= 0,01$ entsprechend einer Spannungsschwankung von $\pm \frac{1}{2}$ Proz., so ist

$$S \geq \frac{4,3}{2} \left(\frac{1,000 - 0,853}{0,005} - 1 \right) = 61 \text{ Sekunden.}$$

Unter S hatten wir die Zeit zum Durchlaufen des gesamten Regulierbereiches von $\alpha = 0$ bis $\alpha = 1$ verstanden. Entspricht der erste Kontakt des Regulators nicht dem Erregerstrom 0, sondern z. B. 40 Proz. des maximalen Erregerstromes ($\alpha = 0,4$), so darf der Regulator den Regulierbereich von $\alpha = 0,4$ bis $\alpha = 1,0$ in 0,6 · 61, also in 37 Sekunden durchlaufen.

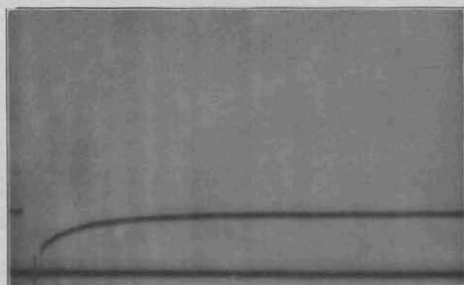
Dieser Wert stimmt mit den Erfahrungswerten der Praxis gut überein, da eine Regulierzeit 0,6 S von 30 bis 45 Sekunden bei größeren Maschinen sich erforderlich erwiesen hat.

Einschaltung:

Fig. 14 a—d.

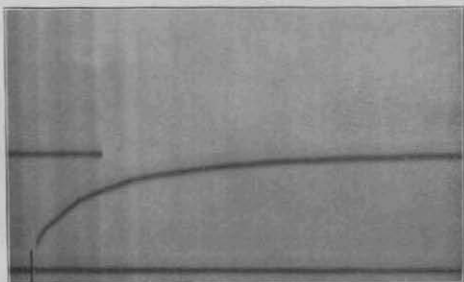
a.

von Nullstrom auf $\frac{1}{4}$ Strom



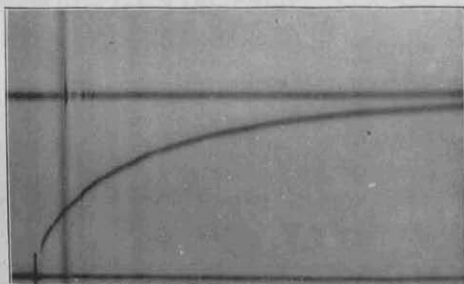
b.

von Nullstrom auf $\frac{2}{4}$ Strom



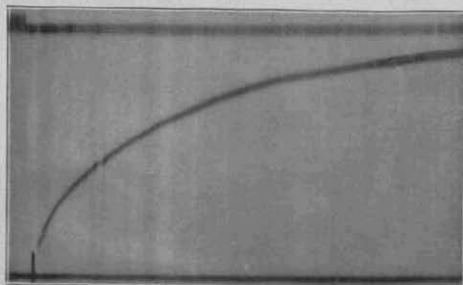
c.

von Nullstrom auf $\frac{3}{4}$ Strom



d.

von Nullstrom auf $\frac{4}{4}$ Strom



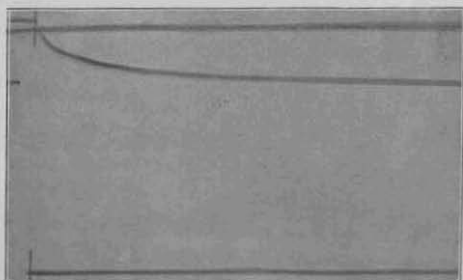
Ansteigende Exponentialkurven, aufgenommen mit dem Oszillographen.

Fig. 14 e—h.

Ausschaltung:

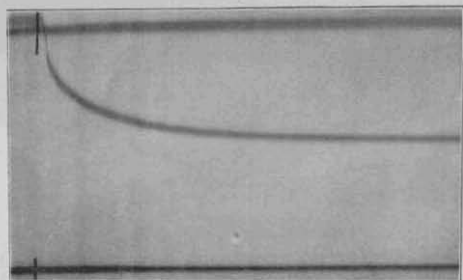
e.

von $\frac{1}{4}$ Strom auf $\frac{3}{4}$ Strom



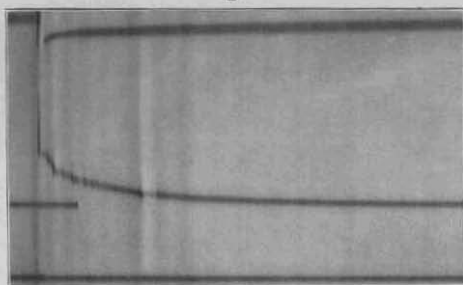
f.

von $\frac{1}{4}$ Strom auf $\frac{2}{4}$ Strom



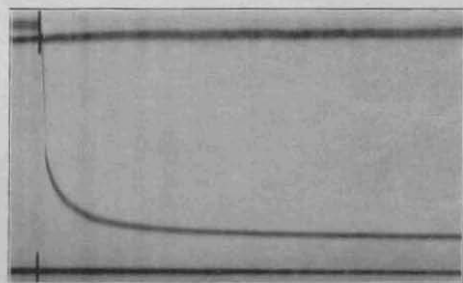
g.

von $\frac{1}{4}$ Strom auf $\frac{1}{4}$ Strom



h.

von $\frac{1}{4}$ Strom auf $\frac{1}{8}$ Strom

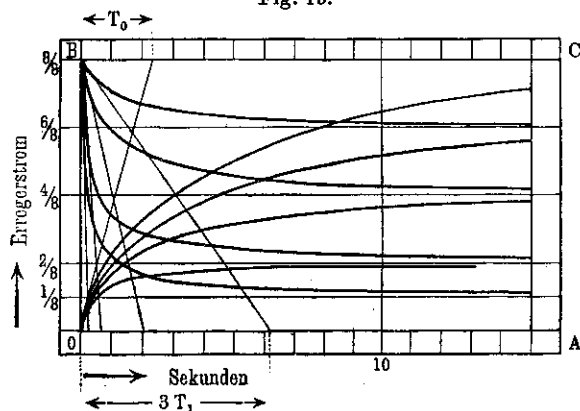


Abfallende Exponentialkurven, aufgenommen mit dem Oszillographen.

Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Um den Nachweis zu erbringen, daß die in Fig. 5 und 6 dargestellten rechnerisch ermittelten Exponentialkurven der Wirklichkeit gut entsprechen, wurden an einer anderen kleineren Maschine derartige Ein- und Ausschaltkurven, Fig. 14 a—d bzw. e—h, mit dem Oszillographen aufgenommen, und zwar gelten die Aufnahmen a bis d der ansteigenden Exponentialkurven für $\alpha = 1/4, 2/4, 3/4, 4/4$ und die Aufnahmen e bis h der abfallenden Kurven für $\alpha = 3/4, 2/4, 1/4$ und $1/3$ ¹⁾. Fig. 15 zeigt die ganze Kurvenschar und entspricht der Fig. 6. Die für diesen Zweck benutzte Maschine ist eine ältere sehr träge Maschine mit verhältnismäßig großen Eisenmassen. Die Maschine

Fig. 15.



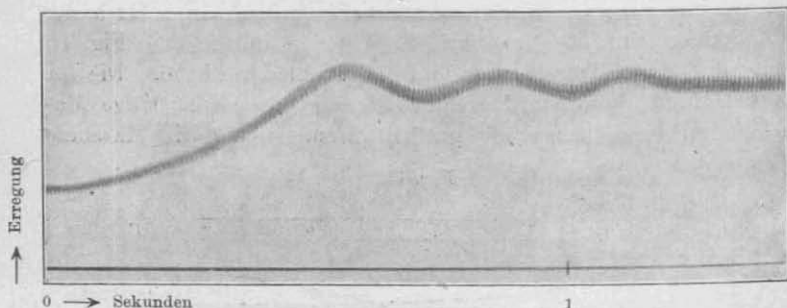
gibt vollbelastet 58 Kilowatt 525 Volt bei 530 Touren und hat einen Schenkelwiderstand von 17,8 Ohm bei einer Erregerspannung von 220 Volt.

Die gemeinsame Tangente der ansteigenden Exponentialkurven schneidet auf der Linie BC die Zeitkonstante für Leerlauf $T_0 = 2,4$ Sekunden ab; die Tangenten der abfallenden Exponentialkurven schneiden auf OA nach Gleichung 5a) für $\alpha = 3/4, 2/4, 1/4, 1/8$ die Werte $3 T_1, 1 T_1, 1/3 T_1, 1/7 T_1$ ab, woraus sich die Zeitkonstante bei Vollast T_1 zu 2,1 Sekunden ergibt.

¹⁾ Für den Wert $\alpha = 0$ kann wegen der auftretenden Überspannungen eine Aufnahme nicht gemacht werden (vgl. Elektrotechn. Zeitschr. 1908, S. 593).

Fig. 16 und 17 zeigen zwei Regulierkurven, die mit einem selbsttätigen Regulator mit Hilfsmotor (vgl. Fig. 30 und 31) aufgenommen wurden. Dabei wurde absichtlich die Reguliergeschwindigkeit zu groß angenommen, nämlich $0,6 S = 11$ Sekunden (statt etwa 30 bis 45). Das Relais war bei Fig. 16 auf eine

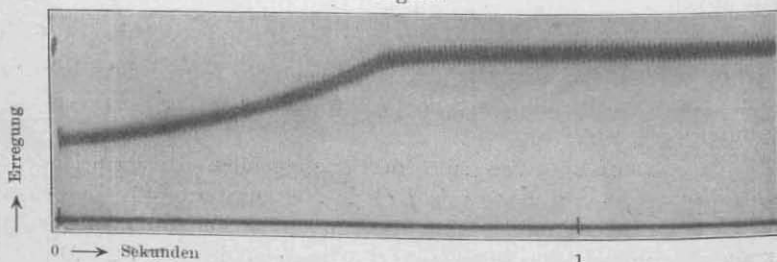
Fig. 16.



Oszillographisch aufgenommene Regulierkurve. Überregulieren bei zu großer Reguliergeschwindigkeit oder zu großer Empfindlichkeit.

Empfindlichkeit von $\pm 1,5$ Proz. eingestellt und es ergab sich bei einer bestimmten Belastungszunahme ein fünfmaliges Überregulieren. Um das letztere zu vermeiden, hätte die Reguliergeschwindigkeit verringert oder nach Gleichung 23) ein größerer

Fig. 17.



Oszillographisch aufgenommene Regulierkurve. Vermeidung des Überregulierens bei richtig bemessener Reguliergeschwindigkeit und Empfindlichkeit.

Unempfindlichkeitsgrad des Relais zugelassen werden müssen. Es wurde daher bei Fig. 17 der Unempfindlichkeitsgrad des Relais auf $\delta = \pm 3,2$ Proz. eingestellt. Fig. 17 zeigt, daß trotz gleicher Belastungszunahme ein Überregulieren nicht mehr eintritt.

Die Messungen wurden an einem Drehstromgenerator aufgenommen, mit dem Oszillographen aber nicht die Maschinenspannung, sondern der Erregerstrom aufgenommen. Die Zacken in den Kurven, welche mit einer Periode von 0,01 Sekunden auftreten, stellen die transformatorische Rückwirkung des Ankerstromes auf den Erregerstrom dar.

4. Beschreibung einiger träger Regulatoren ¹⁾.

Die nachfolgende Beschreibung der bekanntesten derartigen Regulatoren soll weniger eine erschöpfende Erläuterung ihres konstruktiven Aufbaues als vielmehr eine kurze kritische Betrachtung der für die Regulierung besonders in Frage kommenden Elemente geben.

a) Selbsttätige Regulatoren mit Antrieb durch elektromagnetische Kuppelungen.

Die Verwendung der elektromagnetischen Kuppelungen bietet eine Reihe von Vorteilen, welche die meisten übrigen Antriebsvorrichtungen der selbsttätigen trägen Regulatoren nicht aufweisen, während als Nachteile lediglich die etwas komplizierte und teure Bauart und der Umstand, daß eine besondere, langsam laufende Antriebswelle (Transmissionswelle oder Hilfsmotor mit Vorgelege) erforderlich ist, in Frage kommen. Die Vorteile liegen einerseits darin, daß die elektromagnetische Kuppelung in jedem Momente zum Eingriff bereit ist, so daß die Regulierung ohne Zeitverlust eingreifen kann, andererseits darin, daß nach dem Ausschalten der langsam laufenden Kuppelung der Kontakthebel durch die Reibung auf den Kontakten sofort zur Ruhe kommt und nicht etwa durch die lebendige Kraft der Antriebsteile über seinen augenblicklichen Stand hinausweicht. Diese beiden Eigenschaften müssen naturgemäß die Wirkungsweise des Regulators günstig beeinflussen, da ein verzögerter Eingriff der Regulierung die

¹⁾ Nähere Angaben über die nachstehend beschriebenen Regulatoren und Relais finden sich in den technischen Mitteilungen der betreffenden Firmen. Vgl. ferner Niethammer, Elektrische Schaltanlagen u. Apparate, Stuttgart 1905, S. 325—329; Derselbe, Moderne Gesichtspunkte für den Entwurf elektrischer Maschinen u. Apparate 1903, S. 29; Hirschfeld u. Kittilsen, Handbuch der Schaltungsschemata für elektr. Starkstromanlagen, Berlin 1901, Taf. 74—78.

Spannungsschwankungen unnötig lange bestehen lassen und ein verlängerter Eingriff das Überregulieren befördern würde.

1. Die elektromagnetische Kuppelung von Siemens und Halske (Siemens-Schuckertwerke) (Fig. 3 und 18).

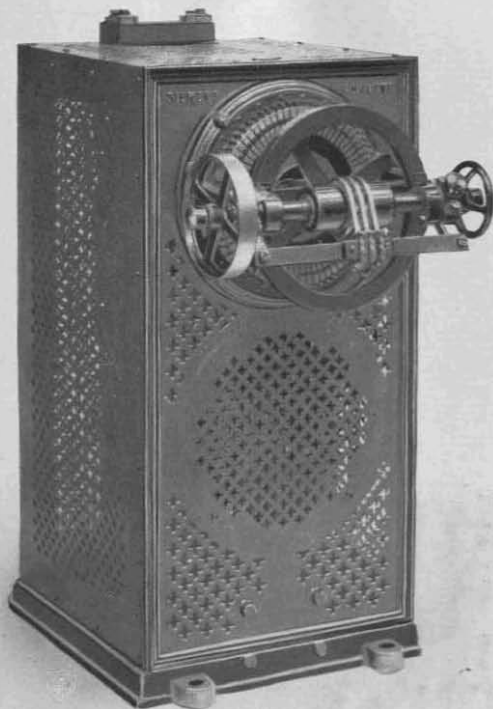
Die Wirkungsweise dieses Apparates wurde bereits genügend erläutert. Es erübrigt, darauf hinzuweisen, daß Fig. 18 den Zusammenbau der Kuppelung mit dem Stufenschalter und Regulierwiderstand erkennen läßt. Mit dem rechts befindlichen kleinen konischen Zahnrad ist ein Handrad verbunden, um erforderlichenfalls den Apparat auch von Hand bedienen zu können. Hilfsmotor, Riementrieb und Steuerrelais sind in Fig. 18 fortgelassen. Da die Kontaktvorrichtungen der Steuerrelais für die direkte Einschaltung des Stromes der elektromagnetischen Kuppelungen meist nicht ausreichen, ist die Anordnung von Zwischenrelais erforderlich, die imstande sind, etwa's größere Energiemengen abzuschalten.

2. Die elektromagnetische Kuppelung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (Fig. 19 und 20¹⁾).

Dieser Apparat ist seiner Wirkungsweise nach dem vorigen ähnlich. Statt der konischen Zahnräder sind jedoch bei demselben konische Reibungsräder verwandt und die Kuppelung besteht aus einer Eisenscheibe, welche durch zwei feststehende Hufeisen-Elektromagnete nach rechts oder links herübergezogen wird und dadurch das rechte oder linke konische Reibrad zum Eingriff bringt. Das Steuerrelais ist mit dem Apparat zusammengebaut. Dasselbe besteht aus einem Solenoid, in welchem ein Anker schwebt, der mit einer Dämpfungsvorrichtung zur Vermeidung des Pendelns versehen ist. Der Anker wirkt auf einen Kontakthebel, welcher die eine oder andere elektromagnetische Kuppelung einschaltet. Um die Einstellung des Kontakthebels auf einen vollen Kontakt zu erzwingen und eine vorzeitige Unterbrechung der Kontakte des Steuerrelais zu verhüten, ist ein zweiter Kontakthebel (Fig. 20), der den vom Steuerrelais ein-

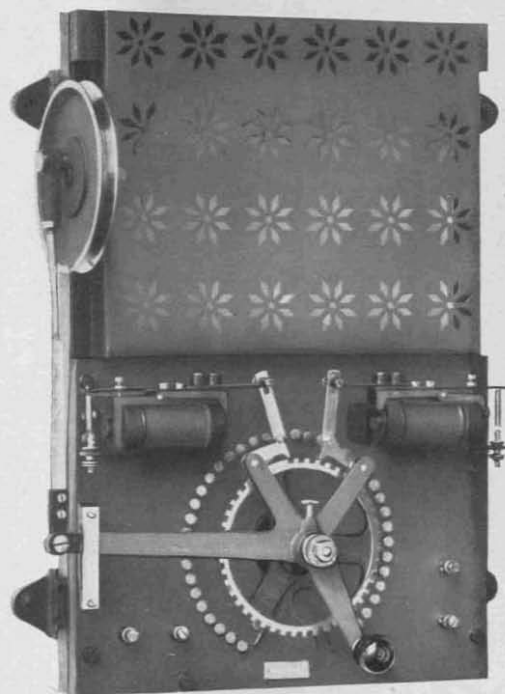
¹⁾ Vgl. D. R.-P. Nr. 89514 vom 8. Februar 1896 und D. R.-P. Nr. 46497 vom 7. Juni 1888.

Fig. 18 (zu S. 28).



Regulator mit elektromagnetischer Kuppelung
von Siemens & Halske (Siemens-Schuckertwerke).

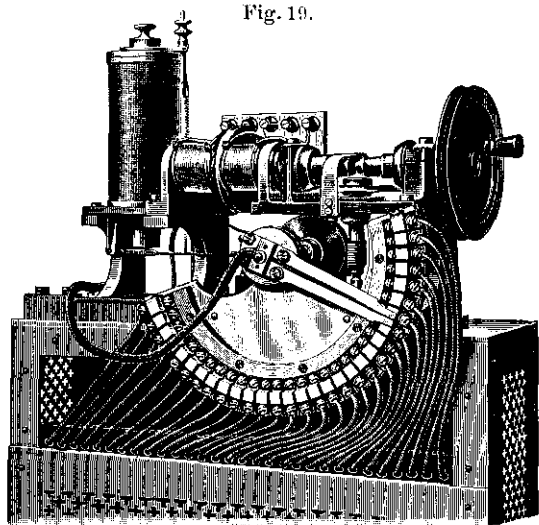
Fig. 23 (zu S. 32).



Regulator mit elektromagnetisch gesteuertem Klinkwerk
der E.-A. vorm. Schuckert & Co. (Siemens-Schuckertwerke).

geleiteten Kontakt übernimmt, und eine mit einem Ausschnitte versehene Abhängigkeitsscheibe angeordnet, welche während des

Fig. 19.



Regulator mit elektromagnetischer Kuppelung der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft.

Übergangs von einem Kontakt zum anderen eine volle Umdrehung macht und den Rückgang des zweiten Kontakthebels

Fig. 20.

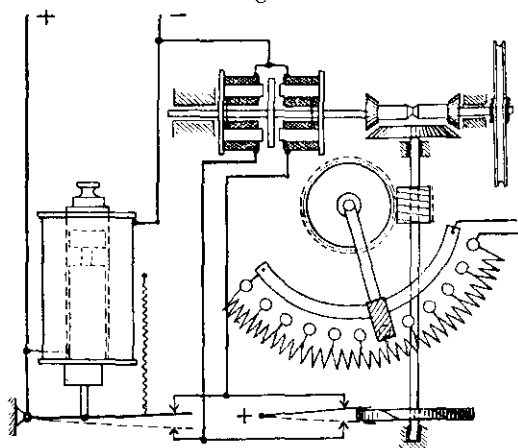
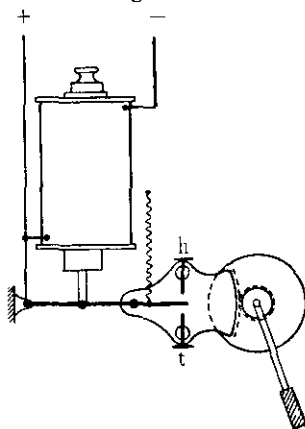


Fig. 20 a.



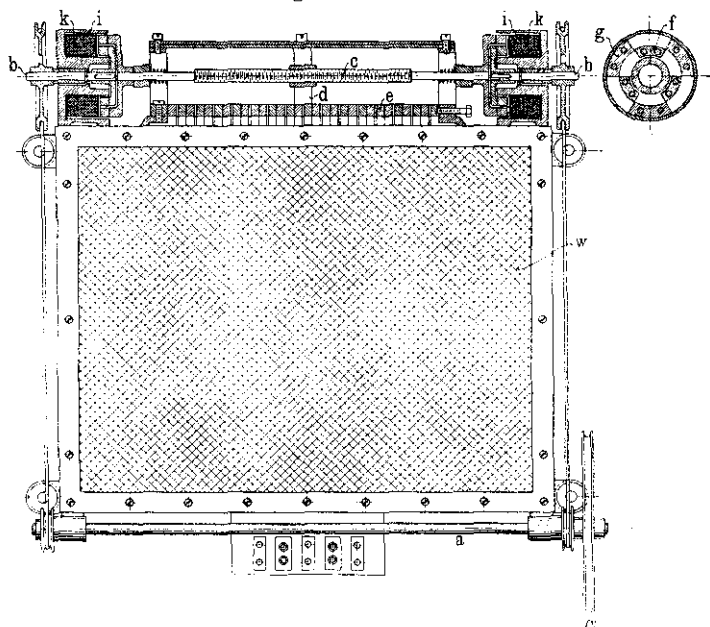
aus einer seiner beiden Kontaktstellungen nur dann zuläßt, wenn die Scheibe ihre Umdrehung vollendet hat¹⁾. Mit Rücksicht auf die beschränkte Wirkung der Friktionsräder dürfte diese Kuppelung nur zur Bewegung kleiner Stufenschalter ausreichen, während die unter 1. erwähnte Kuppelung auch für den Antrieb mehrerer gekuppelter größerer Stufenschalter genügt.

3. Die elektromagnetische Kuppelung der E.-A.-G., vorm. Lahmeyer & Co. (Fig. 21 und 22)

besteht aus einem Rahmen, welcher die Regulierwiderstände W enthält und an dessen oberer und unterer Seite die Antriebsteile

Fig. 21.

Fig. 22.



Regulator mit elektromagnetischer Kuppelung von Lahmeyer.

¹⁾ Eine geänderte Ausführungsform zeigt Fig. 20a; bei dieser sind die Relaiskontakte beweglich angeordnet, um ein Überregulieren zu verhüten. Nähere Erläuterung dieser Einrichtung siehe S. 36, Thury-Regulator.

montiert sind. Unten befindet sich die Antriebswelle a , von welcher aus die beiden oberen kurzen Kuppelungswellen b, b mit offenem bzw. gekreuztem Riemen angetrieben werden. Zwischen den beiden Wellen b, b ist eine dritte mit Schraubengewinde versehene Welle c gelagert, welche den mit der zugehörigen Mutter isoliert verbundenen Kontaktschlitten d des Stufenschalters e bewegt. Die gegenüberliegenden Enden der Wellen b, b und der Spindelwelle tragen Messingscheiben, auf welchen je drei Sektoren f und g aus Eisen aufgeschraubt sind (Fig. 22). Zwei feststehende, gleichzeitig die Lager für die Wellen b, b bildende topfförmige Elektromagnete i, i mit den Wickelungen k, k dienen zur Erregung der sektorförmigen Polansätze. Die Konstruktion bietet den gleichen Vorteil wie die unter 2. erwähnte, nämlich die Verwendung feststehender Elektromagnetwickelungen, besitzt aber den Nachteil gegenüber 1. und 2., daß sie nicht in jedem Moment eingriffsbereit ist, sondern daß beim Einschalten einer der beiden Kuppelungen ein Hubverlust von 0 bis 120° auftreten kann.

b) Selbsttätige Regulatoren mit Antrieb durch Klinkwerke.

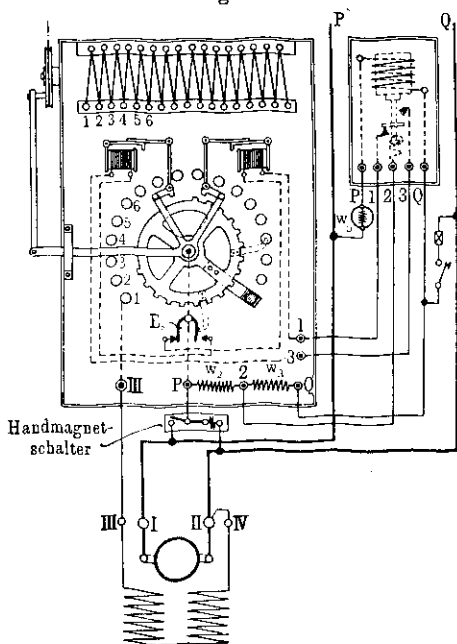
Die elektromagnetisch beeinflussten Klinkwerke bieten ein verhältnismäßig sehr einfaches und betriebssicheres Antriebsmittel für selbsttätige Regulatoren, und sind daher sehr häufig für den Zweck angewandt. Sie benötigen ebenso wie die elektromagnetischen Kuppelungen zum Antrieb einer Hilfskraft (ständig laufende Transmission oder Hilfsmotor). Sie haben aber gegenüber jenen den Nachteil, daß die durch eine Schubkurbel angetriebenen Klinken nur in einer Stellung zum Eingriff mit dem den Kontakt-hebel tragenden Zahnrad kommen, so daß der Beginn der Regulierung um fast eine ganze Umdrehung der Kurbelwelle zu spät einsetzen kann, und daß ein begonnener Vorschub nicht sofort unterbrochen wird, wenn das Steuerrelais dieses erheischt, sondern völlig zu Ende geführt wird. Diesen Nachteilen stehen aber folgende Vorteile gegenüber: Der Stufenschalter wird sehr geschont, da die Bewegung des Kontakthebels nicht schleichend, sondern ruckweise ausgeführt wird. Der Kontakthebel liegt ferner stets auf einem vollen Kontakt; eine teilweise Berührung eines Kontaktes, welche ein Verbrennen der Kontakte und der Kontakt-

bürsten sowie eine größere Erwärmung derselben verursachen könnte, ist ausgeschlossen. Die Elektromagnete zur Betätigung der Klinken können fest gelagert werden und wesentlich kleinere Abmessungen erhalten als diejenigen der elektromagnetischen Kuppelungen.

1. Der selbsttätige Regulator mit elektromagnetisch gesteuertem Klinkwerk der E.-A. vorm. Schuckert & Co. (Siemens-Schuckertwerke) (Fig. 23 und 24).

Dieser Apparat besteht aus einem den Widerstand aufnehmenden Grundrahmen, welcher an der linken Seite den durch

Fig. 24.



eine Schnurscheibe angetriebenen Schubkurbeltrieb und auf seiner unteren Fläche einen dreiarmigen Hebel mit den beiden Klinken nebst den sie beeinflussenden Elektromagneten, sowie den Stufenschalter aufnimmt. Zwischen jedem Elektromagnet und der zugehörigen Klinke ist eine Verbindungsstange eingebaut, deren oberes Gelenk mit Langloch versehen ist, damit die Klinke beim Rückhub leicht über die Zähne des Zahnrades fortgleiten kann. Um den Hub der Kontaktkurbel in beiden Drehrichtungen zu begrenzen und gewalt-

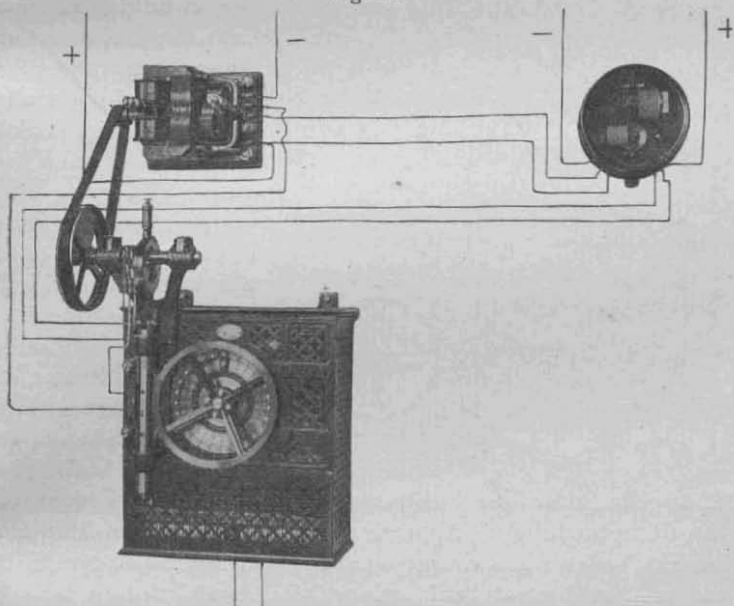
samen Zerstörungen vorzubeugen, sind in dem Zahnrads einige Zahnücken nicht ausgefräst. Damit ferner in den Endstellungen die Elektromagnete nicht dauernd unter Strom bleiben können, sind Endausschalter vorgesehen, deren Wirkungsweise aus dem

Schalt-schema (Fig. 24) erhellt. Dieses Klinkwerk ist nur für die Betätigung eines einzelnen Stufenschalters bestimmt und organisch mit demselben zusammengebaut, während das nachfolgend beschriebene

2. Klinkwerk von Siemens & Halske¹⁾

als Ganzes auf einer besonderen Grundplatte zusammengestellt ist und daher an beliebige Apparate, Nebenschlußregulatoren, Zellschalter usw. angebaut werden kann und auch kräftig

Fig. 25.



Regulator mit elektromagnetisch gesteuertem Klinkwerk von Siemens & Halske (Siemens-Schuckertwerke).

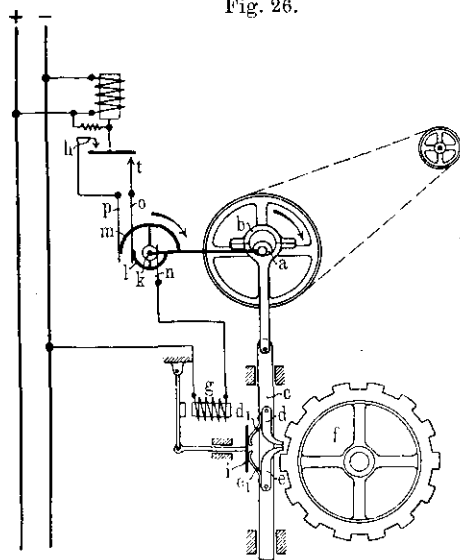
genug konstruiert ist, um mehrere durch Kettenräder gekuppelte Regulatoren gemeinsam antreiben zu können. Dieses Klinkwerk ist in Fig. 25 und 26 (schematisch) dargestellt.

¹⁾ Vgl. Siemens & Halske, Technische Mitteilung Nr. 11, September 1895.

Durch die mittels eines Hilfsmotors mit Riemenübertragung angetriebene Welle *a* wird ein Excenter *b* angetrieben, das die geradgeführte Stange *c* in auf- und abgehende Bewegung versetzt. Die Stange *c* trägt zwei Klinken *d*, *e*, welche in das Zahnrad *f* eingreifen.

Im Gegensatz zu dem vorher beschriebenen Apparat erfolgt aber hier die Steuerung der beiden Klinken durch einen einzigen

Fig. 26.



Elektromagnet *g*, welcher mittels eines Hebels den Teller *i* gegen die Klinken *d*, *e* drückt. Um der nicht in Tätigkeit tretenden Klinke ein Ausweichen gegenüber dem Zahnrad zu ermöglichen, sind die Klinken mit den Federn *d*₁, *e*₁ ausgerüstet.

Wird nun der Teller *i* während eines Aufwärtsganges der Schubstange *c* angedrückt, so erfolgt eine Rechtsdrehung des Zahnrades, im umgekehrten Falle eine Linksdrehung. Die jeweilig erforderliche

Stromgebung für den Elektromagneten *g* wird durch einen mit der Hauptwelle des Apparates verbundenen Kontaktapparat bewirkt, welcher aus einem vollen Kontakttring *k* und zwei Halbringen *l*, *m* besteht, auf welchen die Kontaktfedern *n*, *o*, *p* schleifen, von denen *p* mit dem oberen, *o* mit dem unteren Relaiskontakt verbunden ist. Es ist ersichtlich, daß bei einer Abwärtsbewegung der Schubstange *c* der Kontakt *n*, *o*, bei einer Aufwärtsbewegung der Kontakt *n*, *p* geschlossen ist. Eine Kontaktgebung bei *t* kann daher nur eine Linksdrehung, eine Kontaktgebung bei *h* nur eine Rechtsdrehung des Zahnrades *f* zur Folge haben.

3. Der selbsttätige Regulator mit direkt beeinflusstem Klinkwerk, System Thury (Konstrukteur H. Cuénod¹⁾).

Der Thuryregulator wurde ursprünglich für die Regulierung der Umdrehungszahl der Motoren in dem bekannten Kraftübertragungssystem mit mehreren in Serie geschalteten Gleichstrommotoren verwandt, ist aber später nach entsprechenden Änderungen mit gutem Erfolg auch als Spannungsregulator benutzt.


Charakteristisch für den Regulator ist die direkte Einwirkung des Steuerrelais auf das Klinkwerk²⁾, unter Vermeidung von Zwischenrelais sowie eine Rückstellvorrichtung mit Dämpfung für das Steuerrelais, welche ein Überregulieren verhindern soll, und welche in ähnlicher Weise auch für Turbinenregulatoren benutzt ist.

Fig. 27 zeigt den Apparat nach Entfernung des Stufenschalters, Fig. 28 den vollständigen Apparat.

Durch die mit einer Schnurscheibe angetriebene Kurbelwelle *a* und die Schubstange *b* wird der Winkelhebel *c* in schwingende Bewegung gesetzt. Der Winkelhebel *c* trägt an seinem vertikalen Arm zwei Paar Klinken *d, e* und *f, g* für Vorwärts- und Rückwärtsgang des mit dem Kontakthebel des Stufenschalters gekuppelten Zahnrades *h*. Wenn nun der Ansatz *i* des Steuerrelaishebels in den Weg der Klinken *e* oder *g* kommt, so wird die zugehörige Klinke *d* bzw. *f* ausgelöst und schiebt das Zahnrad um einen Zahn nach links bzw. rechts vorwärts. Beim Rückhub arretiert sich die vorher ausgelöste Klinke wieder an der Klinke *e* bzw. *g*. In Mittelstellung von *i* wird keine der beiden Klinken *e, g* getroffen, bei höchster Stellung von *i* wird *e*, bei tiefster *g* zur Auslösung gebracht. Das Gleichstromsteuerrelais besitzt ähnlich wie ein Deprez-Galvanometer eine Spule *k*, welche zwischen den Polen eines kräftigen topfförmigen Elektromagneten *l*³⁾ schwebt. Spule und

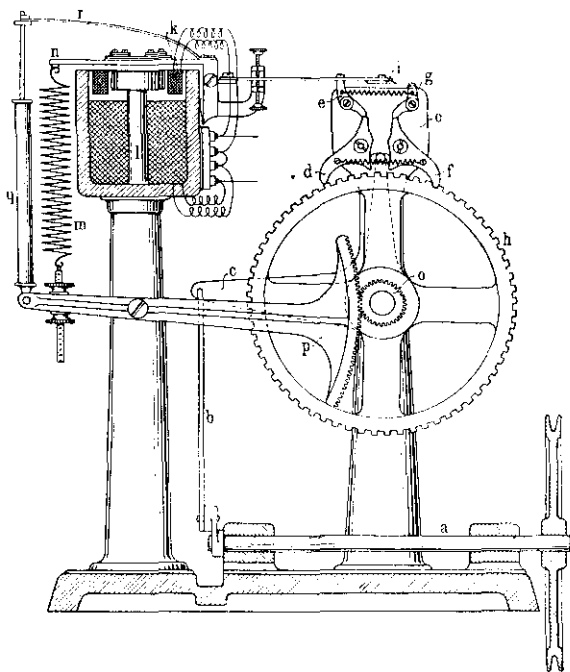
¹⁾ Vgl. D. R.-P. Nr. 46 497; ferner Elektrotechn. Zeitschr. 1905, S. 824, und Elektrische Bahnen und Betriebe 1906, S. 641.

²⁾ Ähnlich später von Bruno Krause, Berlin, vorgeschlagen; vgl. D. R.-P. Nr. 114 304.

³⁾ Das Wechselstromrelais besitzt ein -förmiges, lamelliertes Magnetsystem und eine besondere Öldämpfung für den Anker.

Magnetwicklung liegen in Hintereinanderschaltung an der Spannung. Die Spule *k* erhält durch den Elektromagneten *l* einen Auftrieb, dem die Feder *m* entgegenwirkt. Die Rückwirkung des Stellzeuges auf den Hebel *n* des Steuerrelais geschieht in folgender Weise: Das mit *h* gekuppelte Zahnrad *o* hebt bei einer Linksdrehung von *h* mittels des als zweiarmiger Hebel ausgebildeten

Fig. 27.

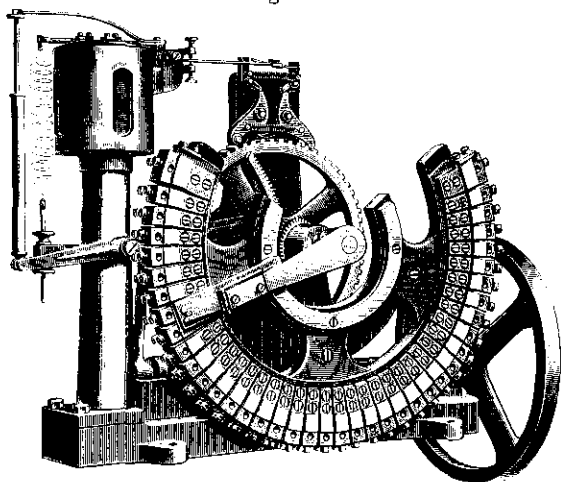


Regulator mit direkt gesteuertem Klinkwerk von Thury.

Zahnsektors *p* den Zylinder der Ölpumpe *q* empor, wodurch der Kolben, welcher an dem federnden Arm *r* des Relaishebels *n* hängt, dem letzteren einen Auftrieb gibt. Da nun die Linksdrehung von *h* bei fallender Spannung durch Herabsinken der Relaisspule *k* bewirkt war, so wird durch die Bewegung des Stellzeuges die Relaisspule wieder in ihre mittlere Lage zurückgedrückt, so daß sie, wenn die Spannung ihren normalen Wert noch nicht wieder

erreicht hat, von neuem sich abwärts bewegen muß. Die Rückstellung des Stellzeuges wirkt daher der Bewegung des Relais, welches die Regulierung eingeleitet hatte, immer gerade entgegen, so daß das Relais immer von neuem aus seiner Mittellage sich herausbewegen muß, um den Reguliertvorgang fortzusetzen. Hierdurch wird zweierlei erreicht. Einerseits wird das Relais veranlaßt, nicht unnötig lange in einer seiner Endlagen zu verweilen, infolge mechanischer Trägheit Lagerreibung usw., andererseits wird die Regulierung vorzeitig unterbrochen, um ein Überregulieren möglichst zu verhüten. Dieses ist am besten an Hand

Fig. 28.



Thury-Regulator.

der Fig. 12 zu erläutern. Wir nehmen an, daß die Spannung gesunken ist und daß in Fig. 27 nach dem ersten Vorschub des Regulators die Feder *r* so beeinflusst ist, daß die Spannung noch mehr sinken müßte, um ein erneutes Ausschlagen des linken Relaishebelarmes *n* nach abwärts zu bewirken. Dann hat die Feder *r* die gleiche Wirkung, als ob das Relais zeitweise für geringere Spannung einjustiert wäre. Das bedeutet aber in Fig. 12, daß die Spannungskurve nicht dem ganzen Linienzuge *BCD* folgen, sondern in einem zwischenliegenden Punkte abbiegen und vielleicht der Kurve 6 weiterfolgen würde. Die erste Regulier-

welle des Thury-Regulators würde daher bereits der zweiten Welle nach Fig. 12 entsprechen, bei welcher die Mittellage auf der Kurve 6 durchlaufen wird. Die federnde Rückstellvorrichtung wirkt somit wie eine zeitweilige Vergrößerung des Unempfindlichkeitsgrades des Steuerrelais. Sobald aber die Feder r unter Wirkung des Ölkataraktes q allmählich wieder entspannt ist, tritt die frühere größere Empfindlichkeit des Regulators wieder ein.

4. Der selbsttätige Regulator mit elektromagnetischem Vorschub von F. Collischon¹⁾.

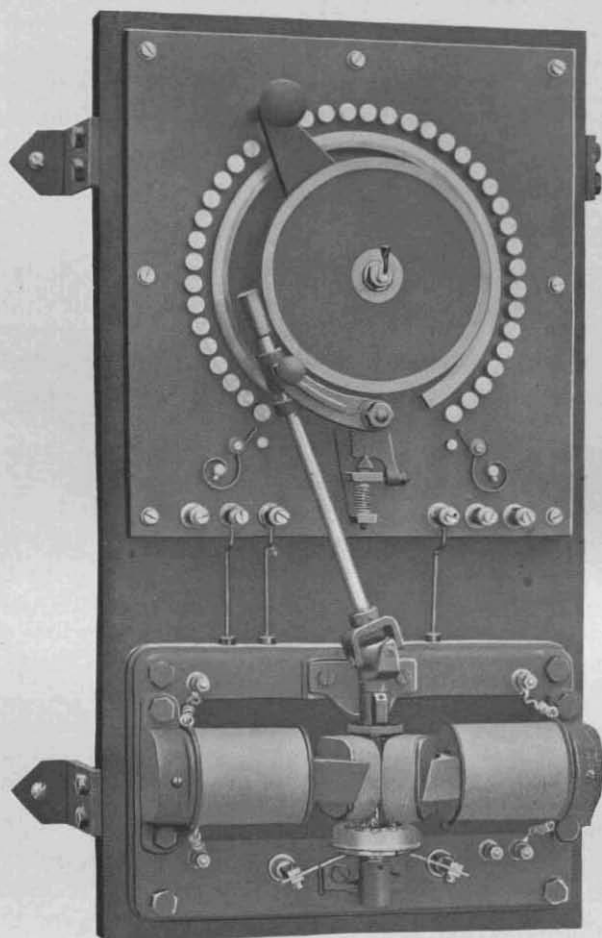
Bei diesem Apparat ist ein besonderer Hilfsmotor oder eine umlaufende Transmission nicht erforderlich, vielmehr erfolgt der Vorschub in beiden Drehrichtungen durch zwei Elektromagnete, die nach Art eines Selbstunterbrechers geschaltet sind und bei jedem Ankerhub das den Kontakthebel tragende Zahnrad mittels einer Klinke um einen Zahn vorwärts schieben. Die beiden Elektromagnete ersetzen ferner das Steuerrelais, indem der eine bei einer geringen Überschreitung der normalen Spannung, der andere bei einer geringen Unterschreitung zu spielen beginnt, bis die normale Spannung wieder erreicht ist. Da die Geschwindigkeit des Vorschubs in keiner Weise gedämpft ist, so ist nach den früheren Erörterungen anzunehmen, daß der Vorschub viel zu rasch erfolgt und daß daher ein Überregulieren unausbleiblich ist. Nach Angabe soll der ganze Regulierbereich in der viel zu kurzen Zeit von fünf Sekunden durchlaufen werden.

c) Selbsttätige Regulatoren mit Antrieb durch Hilfsmotor.

Die vorgenannten Regulatoren brauchten, mit Ausnahme des zuletzt beschriebenen, zu ihrem Betrieb einer ständig umlaufenden Welle, die z. B. durch einen Hilfsmotor angetrieben werden könnte. Es lag daher nahe, den Hilfsmotor direkt mit dem Stufenschalter unter Zwischenschaltung eines Vorgeleges zu verbinden und ihn

¹⁾ Vgl. Elektrotechn. Zeitschr. 1897, S. 357. Ähnlich ist auch der selbsttätige Antrieb mit elektromagnetischem Stoßwerk der Akkumulatorenfabrik, A.-G.; vgl. Hirschfeld und Kittilsen, Tafel 78, Fig. 1.

Fig. 29.



Regulator mit Hilfsmotor der E.-A. vorm. Schuckert & Co.,
ältere Bauart.

nicht ständig, sondern nur so lange und in solchem Drehsinne laufen zu lassen, als es das Steuerrelais erfordert. Diese Anordnung gestaltet sich verhältnismäßig einfach und kompensiös, da alle zum Antrieb erforderlichen Teile in einem einzigen Apparate vereinigt sind. Besondere Aufmerksamkeit erfordert aber der Nachlauf des Hilfsmotors, der unter allen Umständen auf das äußerste beschränkt werden muß, um ein Überregulieren zu verhüten, während die Verzögerung, die durch die Beschleunigung der Massen beim Anlauf verursacht wird, praktisch ohne Bedeutung ist.

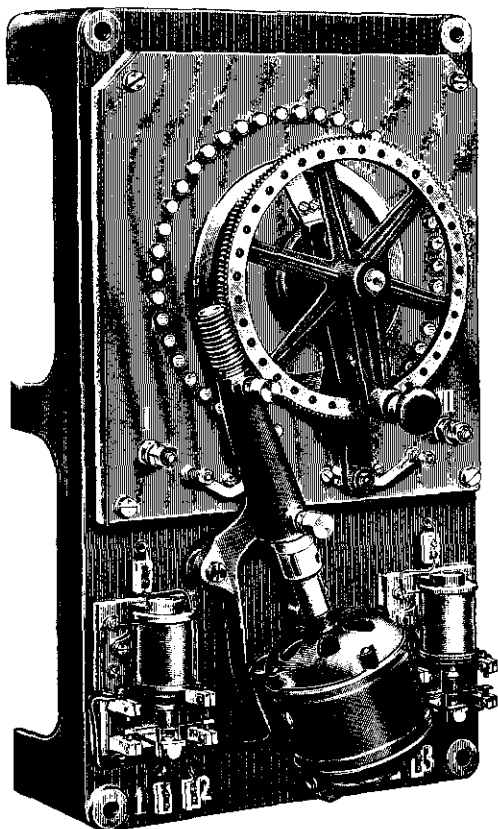
Da die den Nachlauf bewirkende lebendige Kraft des Ankers proportional Jn^2 ist, worin J das Trägheitsmoment und n die Umdrehungszahl desselben bedeutet, so muß man vor allem langsam laufende Motoren verwenden. Ein langsamerer Lauf eines Motors bei gleicher Leistung N kann z. B. durch Verbreiterung des Ankers erzielt werden. Denn ein doppelt breiter Anker besitzt das doppelte Drehmoment und kann daher mit halber Geschwindigkeit laufen; dadurch wird trotz Vergrößerung des Ankergewichtes eine Verringerung der lebendigen Kraft Jn^2 und des schädlichen Nachlaufs auf die Hälfte $2J \frac{n^2}{4} = \frac{1}{2} Jn^2$ erreicht. Hierin soll J das Trägheitsmoment und n die Tourenzahl des einfach breiten, $2J$ und $\frac{n}{2}$ des doppelt breiten Ankers bedeuten. Dieser Gesichtspunkt war hauptsächlich maßgebend bei der Konstruktion der nachstehend beschriebenen Apparate:

1. Der selbsttätige Regulator mit Hilfsmotor der E.-A. vorm. Schuckert & Co., ältere Bauart (Fig. 29).
2. Der selbsttätige Regulator mit Hilfsmotor der Siemens-Schuckertwerke, neuere Bauart (Fig. 30).

Der erstere Apparat besitzt als Antriebsmotor einen Motor mit offener Wicklung, bestehend aus drei Spulen, welche der sternförmig gestaltete Anker trägt. Diese Motoren lassen sich bekanntlich infolge der großen Wickelräume des Ankers für sehr geringe Tourenzahlen wickeln, entsprechen also ohne weiteres den

oben ausgesprochenen Bedingungen. Für den Apparat (Fig. 30) wurde dagegen ein Kleinmotor normaler Bauart benutzt, dessen Tourenzahl durch geeignete Schaltung entsprechend herabgesetzt wurde. Nicht unerhebliche Schwierigkeiten verursacht die Ein-

Fig. 30.



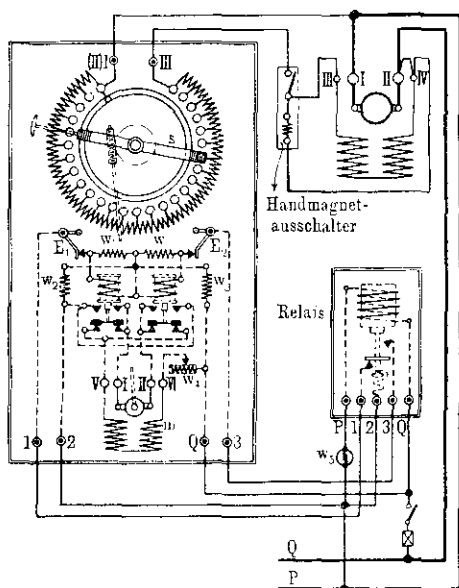
Regulator mit Hilfsmotor der Siemens-Schuckertwerke,
neuere Bauart.

justierung derartiger Apparate, wenn verlangt wird, daß sie zum Durchlaufen des ganzen Regulierbereiches im einen und anderen Drehsinne dieselbe Zeit brauchen sollen. Es zeigt sich nämlich, daß bei nicht genau zentrischem Eingriff der Schnecke in das

ausgehöhlte Schneckenrad die mechanischen Widerstände bei Rechts- und Linkslauf sehr verschieden sind.

Beide Apparate sind ferner noch mit Ausschaltkontakten versehen, welche den Hilfsmotor in den Endstellungen abschalten. Fig. 31 zeigt ein Schaltungsschema des Regulators (Fig. 30), aus welchem auch hervorgeht, daß die Reversierung des Hilfsmotors nicht direkt durch das Steuerrelais, sondern durch zwei kleine Zwischenrelais bewirkt wird.

Fig. 31.



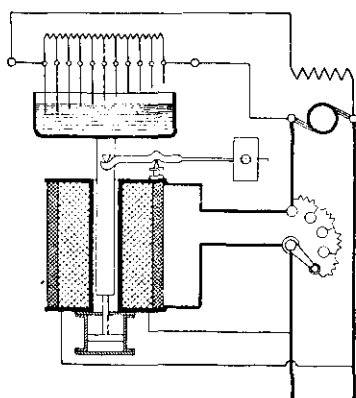
d) Direkt wirkende träge Regulatoren.

Unter direkt wirkenden Regulatoren hat man solche Apparate zu verstehen, bei denen das Steuerrelais die Stufenschalterkontakte in geeigneter Weise direkt betätigt. Würde es möglich sein, die Reguliergeschwindigkeit eines solchen Regulators unendlich groß und die bewegten Massen sehr klein zu machen, so könnte man von einem solchen Regulator erwarten, daß er die normale Spannung nach einer Belastungsänderung nahezu aperiodisch

wieder herstellen würde. Denn in demselben Augenblick, wo die Spannungskurve die Linie E_+ oder E_- schneidet, würde auch das Steuerrelais sich so einstellen, daß die Spannung weder steigt noch fällt. Sobald aber ein direkt wirkender Regulator erhebliche Massen zu beschleunigen hat, die ein Pendeln um seine Mittellage hervorbringen würden, muß man die Bewegung des Steuerrelais durch Dämpfungspumpen oder dergleichen in gleicher Weise verlangsamen, wie die Bewegung aller bisher beschriebenen Apparate. Zu diesen Apparaten wird ferner meist Quecksilber zur Kontaktgehung benutzt, um die Reibungswiderstände auf ein Minimum zu beschränken¹⁾.

1. Der direkt wirkende Regulator von Ganz & Co. und Voigt & Häffner (Fig. 32²⁾)

Fig. 32.



besteht aus einem Solenoid, in welches ein Eisenkern eintaucht, der unten mit einer Dämpfungspumpe, oben mit einem Quecksilbergefaß verbunden ist. In das letztere tauchen mehrere verschieden lange Platinstifte ein, die je nach der Stellung des Kernes den Regulierwiderstand mehr oder weniger kurzschließen. Eine zweite (Hauptstrom-) Wickelung dient zur Kompoundierung, vgl. § 6.

¹⁾ Bei dem Entz-Regulator der Brush Electric Co. (vgl. Elektrotechn. Zeitschr. 1906, S. 324, Fig. 25) besteht der Regulierwiderstand aus aufeinander geschichteten Kohleplatten. Die Veränderung des Widerstandes erfolgt durch Veränderung des Kontaktdruckes, der durch ein im Ankerkreise liegendes Relais erzeugt wird. Da der Kontaktdruck in erheblichem Maße verändert werden muß, läßt sich dasselbe nicht als Spannungsrelais ausführen. Die Einrichtung ist daher nur als Serienregulator verwendbar.

²⁾ Der Regulator von Kalb & Co., Dresden, ist ähnlich ausgeführt.

2. Der Dicksche Regulator, gebaut von den österreichischen Siemens-Schuckertwerken (Fig. 33¹⁾).

Bei diesem Regulator steht das aus vielen isoliert aufeinander gelegten und gelochten Blechplatten bestehende Quecksilbergefäß

fest. Der Eisenkern, welcher teilweise von dem Auftrieb des Quecksilbers, teilweise

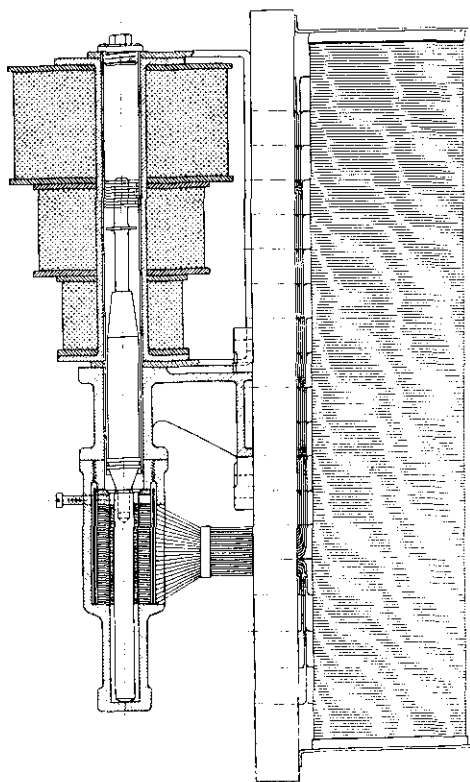
von der Zugkraft des Solenoids getragen wird, hat an seinem oberen Ende einen Dämpferkolben. Bei den älteren Apparaten war der veränderliche Auftrieb des

Quecksilbers durch ein mit dem Kern verbundenes Kippgewicht²⁾ ausgeglichen.

Bei den neueren Apparaten wird derselbe Zweck erfüllt durch eine konische oder treppenförmige Gestaltung des Solenoids³⁾, welche bei steigendem Kern eine lineare Zunahme der Zugkraft infolge verminderter Streuung bezweckt, während

der Quecksilberauftrieb gleichzeitig linear fällt. An die Blechstreifen, welche das Quecksilbergefäß bilden, sind die einzelnen

Fig. 33.



¹⁾ Vgl. D. R. P. 116 545 vom 24. Oktober 1899 und 176 423 vom 28. Febr. 1906 und Elektrotechn. Zeitschr. 1900, S. 80.

²⁾ D. R. P. 116 545.

³⁾ D. R. P. 176 423.

Widerstandsstufen so angeschlossen, daß bei fallendem Ankerkern die Stufen der Reihe nach kurz geschlossen werden.

Der Regulator ist verhältnismäßig unempfindlich gegen Erschütterungen, da der Kern zum größten Teil auf dem Quecksilberschwimmt, der Apparat ist daher mit Erfolg bei der elektrischen Beleuchtung von Eisenbahnwagen benutzt.

5. Die Spannungsrelais.

Die Spannungsrelais werden teils mit den selbsttätigen Regulatoren organisch zusammengebaut, wie Fig. 19, 20, 27, 28, 32 und 33 zeigen, teils getrennt angeordnet, wie die nachstehend beschriebenen Fig. 34 bis 41.

Die Spannungsrelais sollen eine große Empfindlichkeit besitzen und bei einer Spannungsdifferenz von etwa $\pm 1/2$ Proz. ansprechen¹⁾. Die bewegten Teile der Relais müssen sehr geringes Gewicht besitzen, um ein mechanisches Pendeln um die Mittellage zu verhüten, und müssen nach Spannungsschwankungen sich möglichst aperiodisch einstellen. Die Relais müssen ferner eine Spannungsänderung augenblicklich anzeigen. Um das Kontaktfeuer an den Arbeitskontakten der Relais unschädlich zu machen, werden entweder Kondensatoren oder sehr große Widerstände, welche den Strom auf einen sehr geringen Betrag herabdrücken, zwischen die Kontakte geschaltet.

a) Spannungsrelais für Gleichstrom.

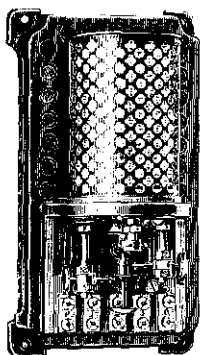
1. Das Gleichstromrelais der E.-A. vorm. Schuckert & Co. (S.-S.-W.), (Fig. 34)

besteht aus einem Solenoid, in dem ein dünnwandiger, oben geschlossener, rohrförmiger Anker durch den Strom in der Schwebe gehalten wird. Der Anker trägt unterhalb eine mit einer elastischen Stromzuführung ausgerüstete Platinscheibe, welche zwischen zwei festen Platinkontakten spielt. Die Magnetspule besitzt keinerlei Eisenrückschluß, ihre Zugkraft ist ein Maximum,

¹⁾ Durch Regulierwiderstände im Stromkreise der Relais lassen sich diese zeitweise für andere Spannungen, z. B. zum Laden von Akkumulatorenbatterien oder dergleichen einstellen.

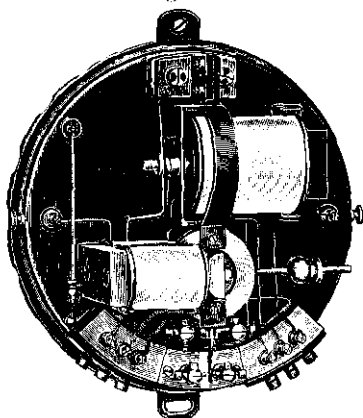
wenn die obere Fläche des Kernes sich etwa in der Mitte der Spule befindet und sinkt bei höherer oder tieferer Lage des Kernes. Es ist daher leicht, das Relais so einzujustieren, daß die geringe Vertikalbewegung des Kernes ohne Einfluß auf die Spannung ist, bei welcher der Kern ausbalanciert wird.

Fig. 34.



Gleichstromrelais der E.-A.
vorm. Schuckert & Co.

Fig. 35.



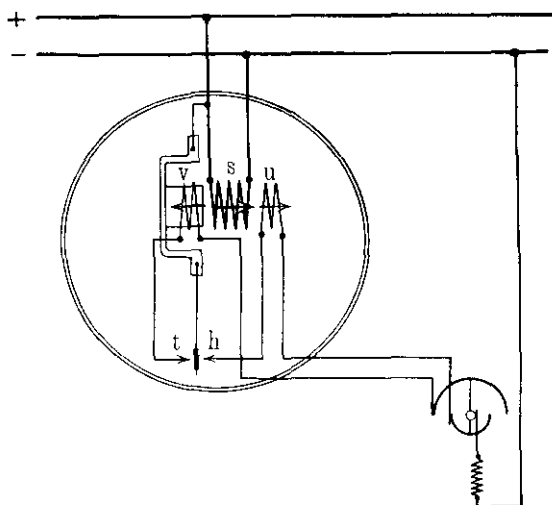
Gleichstromrelais
von Siemens & Halske.

2. Das Gleichstromrelais von Siemens & Halske (Fig. 35 und 36)

besitzt gleichfalls einen leichten Eisenkern, welcher in ein Solenoid mit nur teilweisem Eisenrückschluß eintaucht (obere Spule). Der Eisenkern hängt an einem vertikalen Hebel mit Blattgelenk, welcher unten eine Kupferscheibe trägt, deren Bewegung durch ein kräftiges elektromagnetisches Feld gedämpft ist. Der vertikale Hebel trägt ferner unten rechts ein Gewicht, das der Zugkraft des Solenoids entgegenwirkt; sein Ausschlag ist begrenzt durch zwei Anschlagsschrauben, unter welchen sich die eigentlichen Kontaktschrauben befinden, gegen die sich die federnde Kontaktzunge anlegt. Besonderes Interesse bietet an diesem Relais eine Anordnung, Fig. 36, welche trotz der geringen vorhandenen Kräfte die Erzielung eines guten Kontaktes gewährleisten soll. Zu dem Zweck besitzt das Relais außer der Hauptschule *s*, welche

an der konstant zu haltenden Spannung liegt, zwei Zusatzspulen, deren erstere u in gleichem Sinne (\rightarrow) und deren letztere v in entgegengesetztem Sinne (\leftarrow) wie die Hauptspule (\rightarrow) wirkt. Diese Spulen sind mit den Relaiskontakten h, t verbunden, werden also von dem jeweiligen Steuerstrom durchflossen. Ist die Spannung zu hoch, so daß bei h Kontakt gemacht wird, so wird der anfänglich schwache Kontakt sofort durch die Wirkung der Zusatzspule u verstärkt und ebenso, wenn bei zu niedriger Spannung bei t Kontakt gemacht würde. Diese Zusatzspulen

Fig. 36.



wirken allerdings bei der Öffnung des Kontaktes ungünstig, da der Kontakt länger als beabsichtigt aufrechterhalten wird. Im allgemeinen soll daher auch die Wirkung der Zusatzspulen höchstens dem halben Unempfindlichkeitsgrad entsprechen. Die ungünstige Wirkung der Zusatzspulen wird jedoch völlig beseitigt bei Benutzung des Klinkwerkes Fig. 25 und 26, welches auch der Fig. 36 zugrunde gelegt ist. Bei diesem Klinkwerk wird nämlich, wie früher erörtert wurde, der Steuerstrom nach jeder halben Umdrehung unterbrochen, so daß inzwischen das Relais Zeit hat, den Kontakt wieder zu verlassen, und zwar stromlos zu verlassen.

3. Gleichstromrelais nach Art der Galvanometer System Deprez d'Arsonval (vgl. auch Fig. 27 und 28)

können leicht für größere Zugkräfte konstruiert werden, ohne daß die beweglichen Systeme zu schwer ausfallen, sind aber bisher nur vereinzelt benutzt.

4. Relais mit zwei Magnetsystemen für höchste und tiefste Spannung¹⁾.

Diese Anordnung wurde in einigen Fällen gewählt, in der Absicht, die Empfindlichkeit der Relais zu steigern. Da aber die Empfindlichkeit der Relais mit einem Magnetsystem völlig ausreichend ist, so liegt ein Bedürfnis für diese kompliziertere Anordnung kaum vor.

b) Spannungsrelais für Wechselstrom.

Die soeben beschriebenen Relais für Gleichstrom sind im allgemeinen zum Anschluß an Wechselstromnetze nicht geeignet. Während dieselben nämlich als Gleichstromrelais einen konstanten Strom aufnehmen, der nur von der Spannung und dem Ohmschen Widerstand abhängt, würden sie bei Anschluß an ein Wechselstromnetz einen veränderlichen Strom aufnehmen, dessen Größe außer durch den Ohmschen Widerstand noch durch den die Spule durchsetzenden Kraftfluß bedingt ist, der seinerseits wieder mit der Stellung des Kernes zur Spule sich ändert. Diese Relais zeigen daher bei Speisung mit Wechselstrom ein dauerndes Pendeln und sind deshalb im allgemeinen für Wechselstrom unbrauchbar. Durch Vorschaltung eines großen induktionsfreien Widerstandes und ausreichende Dämpfung können zwar die größeren Pendelerscheinungen, nicht aber kleinere Schwingungen beseitigt werden, welche durch das periodische Schwanken der Zugkraft zwischen Null und dem Maximalwert verursacht werden und die Kontaktgebung verschlechtern.

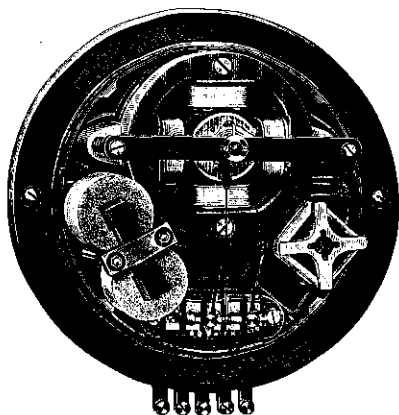
1. Wechselstromrelais von Siemens & Halske (Fig. 37).

Die Theorie dieses Instrumentes ist ausführlich in der E. T. Z. 1901, S. 664, Fig. 35 u. 36 entwickelt. Dasselbe ist ein Ferraris-

¹⁾ Vgl. Elektrotechn. Zeitschr. 1897, S. 357, und 1905, S. 187.

Instrument und enthält ein vierpoliges Magnetsystem mit feststehendem, rundem Ankerkern; in dem schmalen Zwischenraum zwischen den Polen und dem Anker dreht sich ein Kupferzylinder, der die Kontaktzunge trägt. Zwei gegenüber liegende Spulen liegen in Hintereinanderschaltung mit einem induktionsfreien Widerstande, die beiden anderen in Serie mit einer Drosselspule an der Netzspannung. Das erzeugte Drehmoment ist proportional $J_1 J_2 \sin \varphi$, wenn J_1, J_2 die Ströme in den Spulenpaaren und φ

Fig. 37.



Wechselstromrelais von Siemens & Halske.

die Phasenverschiebung zwischen ihnen bedeutet, bei dem vorliegenden Instrumente nahezu 90° . Das Drehmoment wird durch eine Spiralfeder ausbalanciert.

Eine neuere Ausführungsform dieses Relais besitzt Zusatzwickelungen, die in ähnlicher Weise wirken, wie die bei dem Gleichstromrelais S. 46, Fig. 36 beschriebenen, ferner eine Öldämpfung¹⁾, bestehend aus einem einseitig

offenen gebogenen Glasröhrchen, in dem sich ein Kolben kreisförmig bewegt, sowie zwei kleine topfförmige Zwischenrelais, welche die mit dem Relais abzuschaltende Energie erhöhen sollen.

2. Hitzdrahtrelais

sind bisher noch wenig als Spannungsrelais benutzt, doch ist deren Verwendung durchaus nicht ausgeschlossen. Als Hitzdrähte müssen allerdings sehr dünne Drähte von höchstens 0,15 mm Durchmesser verwandt werden, um eine schnelle Kontaktgebung zu erzielen. Ein derartig dünner Draht kann natürlich nur geringe Zugkräfte aus-

¹⁾ D. R. G. M. Nr. 286648; die Flüssigkeit des Dämpfers ist durch Kapillarwirkung am Ausfließen gehindert. Der Apparat kann daher gebrauchsfähig versandt werden.

halten, es empfiehlt sich daher nach dem Vorgang der S.-S.-W., Fig. 38, viele Drähte gleichzeitig auf den Kontaktgeber wirken zu lassen. In diesem Apparate sind 2×10 Drähte benutzt, die entsprechend auch die zehnfache Kraft ausüben können. Die einzelnen Drahtlängen werden je nach der Spannung parallel oder in Serie geschaltet.

Die Hitzdrähte werden in der Regel kniehebelartig gespannt, um ohne komplizierte mechanische Übertragungsmittel große Übersetzung zu erzielen. Das Übersetzungsverhältnis bei einer bestimmten Durchbiegung ergibt sich folgendermaßen: Nach Fig. 39 ist

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad bdb = cdc, \quad \frac{db}{dc} = \frac{c}{b}.$$

Die Übersetzung ist, da die Durchbiegung b stets sehr klein gewählt wird, hauptsächlich abhängig von dieser Größe selbst. Das Übersetzungsverhältnis wird daher mit zunehmender Ausdehnung immer schlechter. Eine günstige Übersetzung bei beliebiger Ausdehnung des Hitzdrahtes erzielen die S.-S.-W.¹⁾ durch

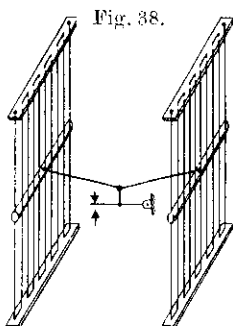


Fig. 38.

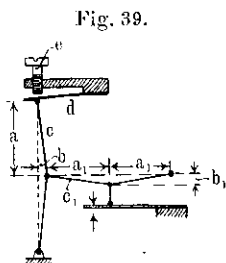


Fig. 39.

Hitzdrahtrelais.

die in Fig. 39 dargestellte Anordnung, bei der der Hitzdraht unter der Wirkung der Blattfeder d sich zunächst ohne Vergrößerung seiner Durchbiegung verlängern kann, bis die Blattfeder gegen den Anschlag e stößt. Erst in diesem Moment erfolgt die weitere Durchbiegung und Kontaktgebung. Um die Übersetzung noch mehr zu vergrößern, wird meist ein zweiter als

¹⁾ D. R. P. 185 207 vom 9. Juni 1906.

Kniehebel gespannter Draht entsprechend Fig. 38, 39 u. 40 verwandt. Das Gesamtübersetzungsverhältnis ergibt sich dann zu

$$\frac{db_1}{dc} = \frac{1}{2} \frac{c}{b} \frac{a_1}{b_1}$$

und bei Verwendung von zwei Hitzdrähten ähnlich Fig. 40 zu

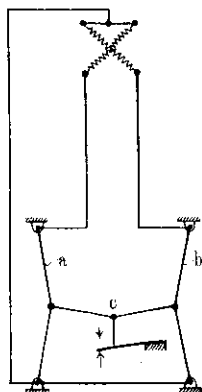
$$\frac{c}{b} \frac{a_1}{b_1}.$$

Ist $a_1 = c$ und $b_1 = b$, so ist das Übersetzungsverhältnis

$$\frac{1}{2} \left(\frac{c}{b} \right)^2 \quad \text{bzw.} \quad \left(\frac{c}{b} \right)^2.$$

Sollen die Hitzdrähte für geringe Polwechselzahl, z. B. 50 Polwechsel (dgl. im Rotorstromkreise von Drehstrommotoren) verwandt werden, so würde der Kontakt unruhig werden. Für diesen

Fig. 40.



Relais für geringe Frequenz.

Fall benutzen die S.-S.-W.¹⁾ eine eigenartige Anordnung, die in Fig. 40 für den Anschluß an ein Zweiphasennetz schematisch dargestellt ist. In die beiden Phasen werden zwei Hitzdrähte a, b gelegt, die mittels des kniehebelartig durchgebogenen Fadens c auf eine gemeinsame Kontaktvorrichtung wirken. Die Ströme in den beiden Hitzdrähten seien $J \sin \varphi$ und $J \cos \varphi$ (mit der Frequenz f), dann sind die Erwärmungen bzw. Durchbiegungen der beiden Hitzdrähte proportional $J^2 \sin^2 \varphi$ bzw. $J^2 \cos^2 \varphi$ (mit der Frequenz $2f$). Die Gesamtdurchbiegung, welche auf c wirkt, ist daher proportional:

$$J^2 \sin^2 \varphi + J^2 \cos^2 \varphi = J^2 = \text{Constans},$$

also unabhängig von der Phase.

Handelt es sich um Drehstrom, so kann man sich entweder die Phasenverschiebung 90° künstlich schaffen, oder man verwendet drei Hitzdrähte a, b, c nach Fig. 41, deren Knickpunkte mit den Ecken eines dreieckigen Blechstückes d verbunden sind,

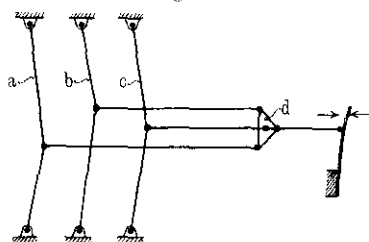
¹⁾ D. R. P. 193 271 vom 29. Januar 1907.

während die Kontaktvorrichtung im Schwerpunkt des Dreiecks angelenkt ist. Auch hier läßt sich leicht nachweisen, daß die Summe der Durchbiegungen, welche proportional

$$J^2 \sin^2 \varphi, \quad J^2 \sin^2 \left(\varphi + \frac{2}{3} \pi \right), \quad J^2 \sin^2 \left(\varphi + \frac{4}{3} \pi \right)$$

sind, gleich einer Konstanten ist, nämlich $= 1,5 J^2$.

Fig. 41.



Drehstromrelais für geringe Frequenz.

6. Künstliche Kompoundierung¹⁾ der Generatoren bei Verwendung träger Regulatoren.

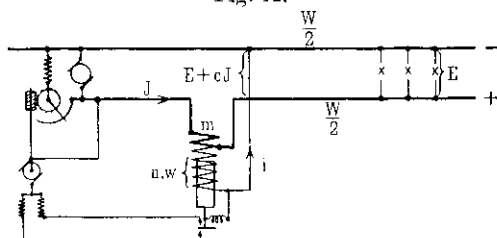
Eine Kompoundierung von Generatoren kann aus zwei Gründen erwünscht sein. Erstens kann die Kompoundierung den Zweck haben, die Zentralenspannung zu Zeiten großen Konsums höher zu halten, um den erhöhten Spannungsabfall in den Kabeln auszugleichen, zweitens kann sie hauptsächlich bei plötzlichen Belastungsstößen eine ebenso plötzliche Erhöhung der Erregung bezwecken.

Eine künstliche Kompoundierung läßt sich nun in sehr einfacher Weise mit nicht kompoundierten normalen Generatoren erreichen, wenn man die Relais derart abändert, daß sie bei höherem Strome auf eine höhere Spannung regulieren. Dabei darf man natürlich nicht erwarten, daß derartige Kompoundrelais in Verbindung mit trägen Regulatoren bei plötzlichen Belastungsschwankungen die Spannung schnell wieder herstellen. Die später zu behandelnden Schnellregulatoren werden dagegen auch dieser Forderung bis zu einem gewissen Grade gerecht.

¹⁾ Vgl. Elektrotechn. Zeitschr. 1897, S. 358; 1900, S. 82; 1904, S. 28 und 1905, S. 86.

Bei dem in Fig. 34 dargestellten Gleichstromrelais ist die Kompoundierung in einfachster Weise durch Hinzufügung einer der Spannungswicklung entgegenwirkenden Hauptstromwicklung, wie in Fig. 42 schematisch dargestellt, erzielt. Ist

Fig. 42.



n die Windungszahl der Spannungsspule,
 w der Widerstand " "
 i der Strom in " "
 m die Windungszahl der Hauptstromspule,
 E die Spannung bei der Belastung $J = 0$,
 $E + cJ$ die Spannung bei der Belastung J ,

so ist die gesamte Amperewindungszahl des Relais

$$ni - mJ = n \frac{E + cJ}{w} - mJ = \text{Constans} = n \frac{E}{w},$$

$$m = \frac{nc}{w}; \quad c = \frac{m}{n} w.$$

Bei einem Strome J reguliert daher das Relais auf eine Spannung von

$$E + \frac{m}{n} w J.$$

Die Einstufung des Relais erfolgt in der Weise, daß zunächst das Relais durch Veränderung des Kerngewichtes bei $J = 0$ auf die Spannung E eingestellt wird. Sodann wird durch Änderung der Windungszahl m oder durch Parallelwiderstand zur Hauptstromspule die Wirkung der letzteren so lange verändert, bis bei einem bestimmten Werte von J die gewünschte Spannungserhöhung $\frac{m}{n} w J$ auftritt.

Soll die Spannung E an einem entfernten Speisepunkte, dessen Hin- und Rückleitung den Widerstand W besitzt, konstant gehalten werden, so muß $\frac{m}{n}w = W$ sein. Ist der Widerstand der Speiseleitungen nicht genau bekannt, so wird die Justierung der Hauptstromspule am besten an Ort und Stelle in der Weise ausgeführt, daß man die Kabel am Speisepunkte kurzschließt und einen provisorischen Widerstand in der Zentrale in die Speiseleitung einschaltet, und die Wirkung der Hauptstromspule so lange verändert, bis die Spannung an dem Widerstand $= E$ wird.

Die Kompoundierung von Wechselstromrelais kann in analoger Weise erfolgen, doch ist hier zu berücksichtigen, daß die Anordnung von zwei verschiedenen Wickelungen auf demselben Eisenkern nur dann zulässig ist, wenn der Spannungswicklung ein sehr großer induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet ist, da anderenfalls die Stromwicklung die Spannungswicklung zu sehr beeinflussen würde; die beiden Wickelungen sollen in ihrer Phase möglichst um 180° versetzt sein. Ferner ist eine Kompoundierung möglich, wenn man das Spannungsrelais mit einem Strom- oder Leistungsrelais mechanisch kuppelt oder durch Hintereinanderschaltung der Sekundärwickelungen eines Strom- und eines Spannungstransformators eine gemischte Spannung für das Relais erzeugt¹⁾.

7. Selbsttätige Regulierung mehrerer parallel arbeitender Generatoren in Verbindung mit trägen Regulatoren.

Für die selbsttätige Regulierung mehrerer Generatoren im Parallelbetrieb kommen vier Anordnungen in Frage:

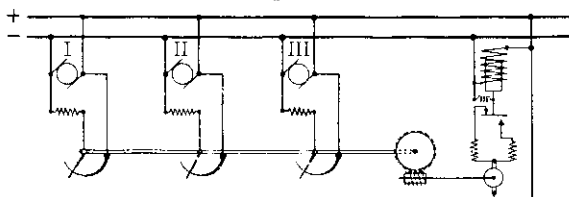
a) Die Generatoren werden aus einem Gleichstromnetz oder einer eigenen Erregermaschine erregt, jeder Generator erhält seinen eigenen Erregerregulator mit Stufenschalter und die Kontakthebel sämtlicher Stufenschalter werden durch geeignete Transmissionen (Welle mit mehreren Schneckenantrieben, Kettenräder mit Ketten usw.) mechanisch gekuppelt und mit einer selbsttätigen Antriebsvorrichtung versehen. Letztere wird durch ein

¹⁾ Vgl. D. R. P. 180430 vom 16. März 1906.

einziges Steuerrelais beherrscht, welches an der Zentralenspannung liegt, wie Fig. 43 für drei parallel arbeitende Gleichstromgeneratoren darstellt¹⁾.

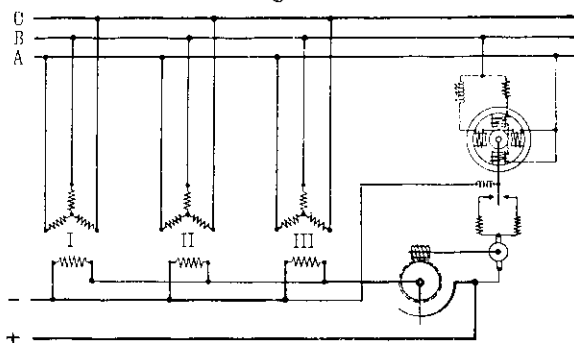
b) Die Magnetwickelungen sämtlicher Generatoren werden parallel geschaltet, und wie eine einzige Magnetwicklung durch einen einzigen bzw. mehrere parallel geschaltete und gekuppelte

Fig. 43.



selbsttätige Regulatoren reguliert, die durch ein Steuerrelais beeinflusst werden, wie Fig. 44 für drei parallel arbeitende Drehstromgeneratoren darstellt. Diese Anordnung könnte man auch als eine elektrische Kuppelung der Regulatoren bezeichnen.

Fig. 44.



c) Man reguliert nur einen Teil der parallel arbeitenden Maschinen selbsttätig und stellt die Erregung der übrigen Maschinen auf einen festen Mittelwert ein. Dieses Verfahren wird besonders bei Ein- und Mehrphasengeneratoren angewandt, wobei die Differenz zwischen der erforderlichen und der vorhandenen Er-

¹⁾ Vgl. auch Elektrotechn. Zeitschr. 1905, S. 825.

regung der nicht regulierten Maschinen durch Ausgleichströme erzeugt wird. Sofern die Ausgleichströme nicht zu groß werden, arbeitet eine solche teilweise Regulierung recht gut, und man kann von diesem sehr einfachen Verfahren in vielen Fällen guten Gebrauch machen, z. B. wenn einzelne entfernt stehende Maschinen mit einer größeren Zentrale parallel arbeiten, oder wenn die Erregerspannungen der Maschinen so verschieden sind, daß z. B. die elektrische Kuppelung nach b) schwer ausführbar sein würde. Bei sehr großen Ausgleichströmen kann jedoch eine Verzerrung der Spannungskurve und andere Störungen auftreten. Eine Verringerung der Ausgleichströme läßt sich erzielen, wenn man den Regulator etwas unterkompoundieren läßt.

d) Jeder Generator erhält seinen eigenen selbsttätigen Regulator und sein Steuerrelais. Zu dieser Regulierungsart muß man greifen, wenn die Charakteristiken der Maschinen oder ihre Abmessungen so verschieden sind, daß die unter a), b) und c) erwähnten einfacheren Methoden versagen. Ein solcher Fall kann z. B. dann eintreten, wenn Turbogeneratoren mit langsam laufenden Maschinen zusammen arbeiten sollen. Auch beim Parallelbetriebe von Maschinen mit massiven und geblättern Magneten können sich derartige Schwierigkeiten zeigen, da die letzteren bei einer Verstärkung der Erregung schneller folgen, und daher bei einer Belastungszunahme bestrebt sind, zunächst einen größeren Teil der Belastung aufzunehmen. Gibt man jedem Generator sein eigenes Steuerrelais, so müssen die letzteren aber unter allen Umständen so ausgestaltet werden, daß die Belastung sich auf die einzelnen Maschinen gleichmäßig verteilt. Fig. 45 zeigt eine derartige Anordnung für drei parallel arbeitende Gleichstromgeneratoren¹⁾, Fig. 46 für drei Wechselstromgeneratoren²⁾. Die Vorgänge, die hierbei zu berücksichtigen sind, mögen nachstehend näher erläutert werden:

Beim Parallelbetriebe von Generatoren ist zu beachten, daß unter der Voraussetzung konstanter Spannung und Tourenzahl einer bestimmten Nutzbelastung des Generators einerseits eine ganz bestimmte Erregung, andererseits eine ganz bestimmte Einstellung der Kraftzufuhr des Motors (z. B. Füllungsgrad der

¹⁾ Vgl. D. R. P. der S.-S.-W. 177 269 vom 16. Dezember 1905.

²⁾ Vgl. D. R. P. der S.-S.-W. 180 430 vom 16. März 1906.

Dampfmaschine), d. h. eine bestimmte Stellung des Tourenregulators entspricht. Ist die der Kraftzufuhr entsprechende Erregung nicht vorhanden, so ist der Gleichgewichtszustand gestört.

Handelt es sich um Gleichstromgeneratoren, so wird bei zu geringer Erregung eines Generators dieser nebst seiner Antriebsmaschine eine höhere Umdrehungszahl anzunehmen suchen, und dadurch einerseits die elektromotorische Kraft des Generators erhöhen, andererseits die Kraftzufuhr und somit auch die Leistung des Antriebsmotors herabsetzen. Der Gleichgewichtszustand wird wieder erreicht, wenn die der verringerten Kraftzufuhr und erhöhten Tourenzahl entsprechende Erregung gleich der vorhandenen Erregung ist. Während der Störung des Gleichgewichtszustandes können Ausgleichströme zwischen den Maschinen auftreten, welche die schwächer erregte Maschine zeitweise als Motor antreiben und bis zur Erreichung des neuen Gleichgewichtszustandes beschleunigen. Werden die Gleichstromgeneratoren von synchronen oder asynchronen Drehstrommaschinen angetrieben, oder handelt es sich um Einankerumformer, so daß die einzelne Maschine keine höhere oder niedrigere Tourenzahl annehmen kann als die übrigen, so werden dieselben wesentlich empfindlicher, da in diesem Falle nur die geringen Spannungsverluste in den Ankern und die Ankerrückwirkung, letztere jedoch nur bei positivem ¹⁾ Strome, die schwächer erregte Maschine schützen.

Bei parallel arbeitenden Wechselstromgeneratoren ist die Nutzbelastung zwar auch hauptsächlich durch die Kraftzufuhr der Antriebsmaschine gegeben, dagegen ist es ebenso wie bei den zuletzt erwähnten Drehstrom-Gleichstromumformern wegen ihres synchronen Laufes unmöglich, daß eine einzelne Maschine eine höhere Tourenzahl annimmt, falls sie zu gering erregt ist. Hier sind es lediglich die wattlosen Ausgleichströme, welche die stärker erregten, in der Phase voreilenden Maschinen in ihrer Erregung schwächen und die schwächer erregten nachteilenden verstärken. Würde man daher die Erregung einer einzelnen Maschine verstärken, so würde man nicht etwa die Spannung der Maschine

¹⁾ Die Ankerrückwirkung ist bei Nullstrom ein Minimum. Bei negativem sowohl wie bei positivem Strome wirkt die Ankerrückwirkung feldverzerrend, also feldschwächend. Die Gefahr, daß das Feld ganz fortgeblasen wird, wächst daher bedeutend, wenn der Strom durch Null geht und negativ wird.

erhöhen, sondern nur die Veranlassung zu Ausgleichströmen geben, welche hauptsächlich wattlos¹⁾ sind.

Nehmen wir als Antriebsmaschinen Dampfmaschinen, Turbinen oder ähnliche untereinander nicht starr gekuppelte Maschinen mit Regulatoren für konstante Tourenzahl an, so wird durch die Verstärkung der Erregung eines Generators bei Gleichstromgeneratoren die Übernahme eines größeren Teiles der Nutzlast, bei Drehstromgeneratoren nur die Abgabe von wattlosen Ausgleichströmen bewirkt.

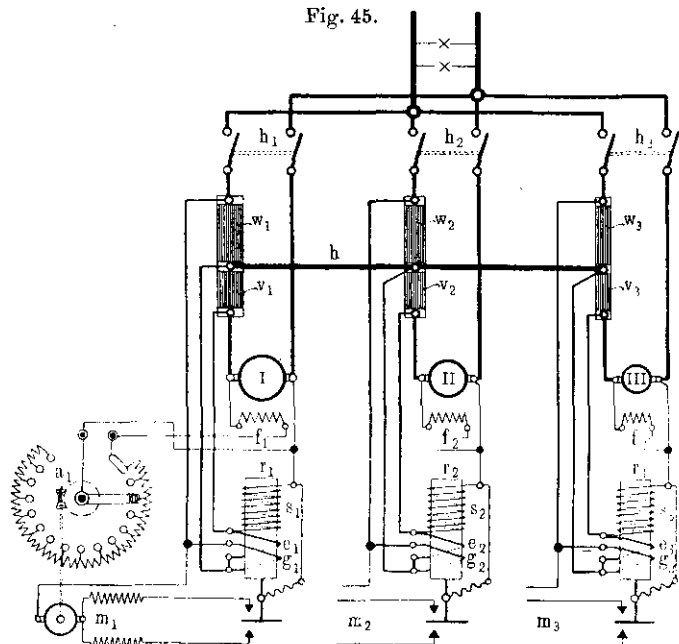
Würde man jedem Generator ein Steuerrelais gewöhnlicher Bauart geben, so erscheint es ausgeschlossen, sämtliche Relais für absolut gleiche Spannung einzujustieren. Es würde daher bei einem Spannungsabfall die Erregung eines Generators vorzugsweise verstärkt werden, und bei einer Wiederholung des Vorganges würde dieser Generator allmählich bei Gleichstrom die ganze Nutzlast und bei Wechselstrom die gesamten wattlosen Ströme übernehmen. Hieraus ist ersichtlich, daß man den Steuerrelais eine besondere Einrichtung geben muß, die bei Gleichstrom eine proportionale Verteilung der Nutzlast, und bei Drehstrom eine proportionale Verteilung der wattlosen Ströme bewirkt.

Die Fig. 45 zeigt eine derartige Regulierung für drei parallel arbeitende Gleichstromgeneratoren I, II, III, deren Leistungen sich wie $\alpha : \beta : \gamma$ verhalten mögen ($\alpha + \beta + \gamma = 1$), und welche sich bei beliebiger Gesamtbelastung der Zentrale stets im gleichen Verhältnis $\alpha : \beta : \gamma$ an der Energielieferung beteiligen sollen. Jeder Generator erhält sein eigenes Relais $r_1 r_2 r_3$ und seinen eigenen getrennt gesteuerten Nebenschlußregulator $a_1 a_2 a_3$; in der Zeichnung sind die Regulatoren $a_2 a_3$ der Übersicht halber fortgelassen. Die Relais besitzen außer den Spannungswickelungen $s_1 s_2 s_3$ noch je zwei Hauptstromwickelungen $e_1 e_2 e_3$ und $g_1 g_2 g_3$, deren erstere mit der Spannungswickelung gleichsinnig, deren letztere der Spannungswickelung entgegengesetzt von Strom durchflossen werden.

¹⁾ Außer den wattlosen Ausgleichströmen sind noch phasengleiche Ausgleichströme zu berücksichtigen, welche ein Vor- und Nachteilen der Polräder verhüten und daher hauptsächlich den Synchronismus erhalten. Derartige Ausgleichströme dürfen durch die Regulierung natürlich nicht beseitigt werden, damit die Maschinen nicht außer Tritt fallen.

Mit $v_1 w_1, v_2 w_2, v_3 w_3$ sind Abzweigwiderstände bezeichnet, mit $h_1 h_2 h_3$ Schalter, die zum Abschalten der einzelnen Maschinen dienen. Durch die Widerstände $v_1 v_2 v_3$ fließen die Einzelströme der Maschinen, durch die parallel geschalteten Widerstände $w_1 w_2 w_3$ dagegen der Gesamtstrom der Zentrale in der durch die Beträge der Widerstände $w_1 w_2 w_3$ bestimmten, aber von den einzelnen Maschinen unabhängigen Verteilung.

Fig. 45.



Die Widerstände sind so bemessen, daß

$$\frac{1}{v_1} : \frac{1}{v_2} : \frac{1}{v_3} = \frac{1}{w_1} : \frac{1}{w_2} : \frac{1}{w_3} = J_1 : J_2 : J_3 = \alpha : \beta : \gamma$$

ist, wobei $J_1 J_2 J_3$ die Einzelströme der Generatoren bedeuten und die Widerstände der zu $v_1 w_1, v_2 w_2, v_3 w_3$ parallel geschalteten Relaiswickelungen in die Widerstandswerte eingeschlossen sind.

Wenn gleiche Belastungsverteilung herrscht, d. h. wenn

$$J_1 = J \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma}; \quad J_2 = J \frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma}; \quad J_3 = J \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma}$$

ist, so fließt durch die Abzweigwiderstände v_1 und w_1 der gleiche Strom. Nimmt man ferner zunächst den einfachsten Fall an, daß $v_1 = w_1$, $v_2 = w_2$, $v_3 = w_3$ ist, so werden die Wirkungen der beiden Hauptstromspulen sich aufheben, wenn

$$J_1 = J \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma}$$

usw. ist, d. h. wenn die Ströme auf die Maschinen richtig verteilt sind. Ist dagegen

$$J_1 > J \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma},$$

so wird die Spannungsspule s_1 entsprechend der positiven Differenz der Amperewindungen der Stromspulen unterstützt, und der selbsttätige Regulator ebenso beeinflusst, als ob die Spannung zu hoch wäre; umgekehrt, wenn

$$J_1 < J \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma} \text{ ist.}$$

Bei gleichen Maschinenleistungen ist $v_1 = v_2 = v_3$ und $w_1 = w_2 = w_3$ und

$$J_1 = J_2 = J_3 = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{3} = \frac{J}{3}.$$

Bisher war angenommen, daß $w_1 = v_1$, $w_2 = v_2$, $w_3 = v_3$ ist. Wählen wir aber $w_1 > v_1$, $w_2 > v_2$, $w_3 > v_3$, so regulieren die Steuerrelais nicht mehr auf konstante Spannung, sondern mit steigendem Gesamtstrom überwiegt die Wirkung der Hauptstromwickelungen $g_1 g_2 g_3$ immer mehr die der Wickelungen $e_1 e_2 e_3$.

Im gleichen Maße muß aber die Netzspannung steigen, um die Gesamtamperewindungszahl der Relais konstant zu halten. Die Hauptstromwickelungen e, g lassen sich daher in ähnlicher Weise, wie in Fig. 42 für einen einzelnen Generator dargestellt, für die künstliche Compoundierung der ganzen Zentrale verwenden.

Durch Verschiebung der Anschlüsse für die Hauptstromwickelungen an den Abzweigwiderständen erfolgt die Einstellung der Relais.

Wird ein Generator abgeschaltet, so bleibt nach Öffnen des zugehörigen Hebelschalters, z. B. h_3 , die richtige Stromverteilung für die Abzweigwiderstände und Hauptstromwickelungen der an-

deren Maschinen bestehen. Denn die Stromverteilung erfolgt dann wie

$$J \frac{\alpha}{\alpha + \beta} : J \frac{\beta}{\alpha + \beta},$$

also auch wieder im richtigen Verhältnisse $\alpha : \beta$. Ausgeführte Versuche haben gezeigt, daß man mit einer derartigen Einrichtung die richtige Verteilung der Belastung mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 2,5$ Proz. leicht erreichen kann.

Fig. 46.

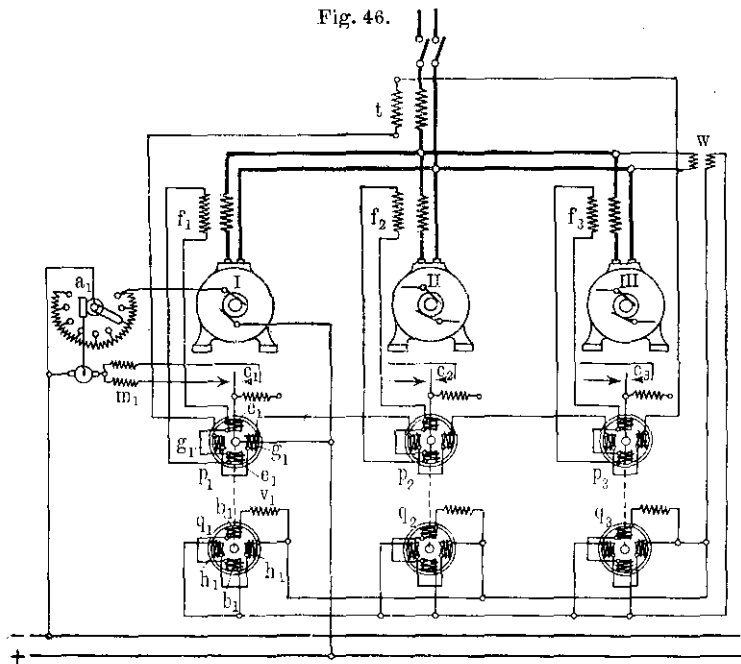


Fig. 46 zeigt eine ähnliche Regulierung für drei parallel arbeitende Wechselstromgeneratoren I, II, III, welche die Vermeidung von Ausgleichströmen und die richtige Verteilung der wattlosen Ströme auf die einzelnen Generatoren sowie die Konstanthaltung der Spannung bezweckt. Jeder Generator erhält seinen eigenen Erregerregulator $a_1 a_2 a_3$ (die letzteren beiden sind nicht dargestellt) und je ein Doppelrelais $p_1 q_1$, $p_2 q_2$, $p_3 q_3$, welches durch mechanische Kuppelung der Achsen je zweier Relais $p q$ gebildet wird und je eine gemeinsame Kontaktzunge $c_1 c_2 c_3$ be-

sitzt. Die Relais $q_1 q_2 q_3$ sind Spannungsrelais, welche mittels des Spannungstransformators w an die Netzspannung angeschlossen sind. Die Relais $p_1 p_2 p_3$ zeigen die positive oder negative Phasendifferenz des Stromes der betreffenden Maschine $J_1 J_2 J_3$ und des Gesamtstromes J an. Es werden daher die horizontalen Spulen dieser Relais von einem Strome durchflossen, der von dem Stromtransformator t geliefert und dem Gesamtstrome J phasengleich ist, während der Strom der vertikalen Spulen, welche an die Stromtransformatoren $f_1 f_2 f_3$ angeschlossen sind, dem Strome des betreffenden Generators $J_1 J_2 J_3$ phasengleich ist. Das von dem Relais p_1 ausgeübte Drehmoment ist proportional $J_1 J \sin \varphi$, wenn J_1 gegen J um den Winkel φ voreilt, und dem Drehsinn des Relais q_1 bei positivem Werte von φ gleichgerichtet. Bei zu hoher Netzspannung oder bei voreilem Strome des betreffenden Generators wird daher die Erregung desselben geschwächt, bei zu geringer Spannung oder bei nacheilendem Strome verstärkt.

Eine künstliche Compoundierung kann auch hier erreicht werden, wenn man z. B. den Spannungsrelais $q_1 q_2 q_3$ eine gemischte Spannung zuführt, die durch Hintereinanderschaltung der Sekundärwickelungen von Strom- und Spannungstransformatoren gebildet werden kann.

Schließlich sei noch erwähnt, daß man bei den in Fig. 43 bis 46 dargestellten Reguliervorrichtungen dafür sorgen muß, daß man die Hilfsmotoren für den Antrieb der Regulatoren abkuppeln kann, um im Notfalle durch einen besonders vorzusehenden Handantrieb beim Versagen des selbsttätigen Antriebes regulieren zu können. Bei der Anordnung Fig. 43 muß ferner die Möglichkeit gegeben sein, jeden einzelnen Regulator von dem gemeinsamen Antriebe loszukuppeln, um ihn mittels eines besonders vorgesehenen Handantriebes verstellen und etwaige Differenzen in der Erregung ausgleichen zu können.

8. Die Schnellregulatoren.

Im Abschnitt 3 wurde nachgewiesen, daß die trägen Regulatoren eine verhältnismäßig geringe Reguliergeschwindigkeit erhalten müssen, um nicht überzuregulieren.

Von dieser Einschränkung ist nur eine Ausnahme zu machen, das ist der bereits auf S. 41 angedeutete ideale Fall eines masselosen Regulators mit unendlich großer Reguliergeschwindigkeit.

Es erscheint zwar ausgeschlossen, einen solchen Regulator herzustellen, bei dem der Kontakthebel des Stufenschalters direkt von dem Spannungsrelais betätigt wird, da die Erregerstromstärken größerer Drehstromgeneratoren oft 100 und mehr Ampere betragen und Stufenschalter ganz erheblicher Abmessungen erfordern; es gibt aber verschiedene Mittel, um den gewünschten Zweck, die Regulierung erheblicher Energien in der angedeuteten Weise zu steuern, auf indirektem Wege zu erreichen und dem idealen Falle wenigstens sehr nahe zu kommen. Ein derartiger Regulator hat nun eine ganz besonders wertvolle Eigenschaft, die durch den Ausdruck „Schnellregulator“ gekennzeichnet sein möge. Er bewegt, wenn wir auf die schematische Darstellung Fig. 4 zurückgreifen, den Kontakthebel *m* bei einer Spannungsabnahme momentan so weit wie möglich nach links bis auf den Kurzschlußkontakt, wodurch die gewünschte Spannungszunahme des Generators auf dem denkbar schnellsten Wege erfolgt, und er führt den Kontakthebel, wenn der richtige Wert der Spannung wieder erreicht ist, ebenso momentan in die jeweilig erforderliche Stellung zurück. Das Umgekehrte würde bei einer Spannungszunahme eintreten. Die Ausregulierung der Spannungsschwankungen wird daher durch eine zeitweise Über- bzw. Unterregulierung wesentlich beschleunigt. Man kann hinsichtlich dieser Wirkung den Schnellregulator vergleichen mit einem Reitpferde, welches durch kräftige Peitschenhiebe und Gebrauch der Sporen plötzlich in eine andere Bahn gelenkt und durch einen Hieb von der Gegenseite pariert wird, während die Wirkung eines trägen Regulators dem sanften Gebrauche der Zügel gleichkommt. Die größten Schwierigkeiten bereitet bei den Schnellregulatoren die Ein- und Ausschaltung der nicht unerheblichen Energiemengen. Um diese mit einem möglichst leichten Spannungsrelais beherrschen zu können, sind folgende Hilfsmittel benutzt:

1. Das Spannungsrelais betätigt einen ganz leichten Stufenschalter mit einer größeren Reihe schwacher Kontakte, an welche die Magnetwickelungen von Zwischenrelais angeschlossen sind, die ihrerseits zur An- und Abschaltung größerer Energiemengen geeignet sind.

2. Man reguliert nicht die Widerstände im Erregerkreise des Generators, sondern verändert den Erregerstrom bei kurzgeschlossenem Erregerregulator durch Änderung der Spannung der

Erregermaschine, indem man im Erregerkreise der Erregermaschine Widerstände kurz schließt oder öffnet. Nimmt man beispielsweise an, daß eine Erregermaschine 2 Proz. ihrer Leistung für ihre eigene Erregung braucht, und daß die Erregung auf die Hälfte, also 1 Proz., geschwächt werden muß, so braucht der Regulator oder ein durch ihn ein- und ausgeschaltetes Zwischenrelais nur noch den hundertsten Teil der Energie zu steuern. Bei der Annahme einer unendlich großen Reguliergeschwindigkeit ist es ferner zulässig, statt eines vielstufigen Regulators nach Fig. 4 einen solchen mit nur zwei Stufen zu wählen und durch längeres oder kürzeres Verweilen des Kontakthebels auf dem einen oder anderen Kontakt, d. h. durch periodisches Kurzschließen eines festen Vorschaltwiderstandes, die mittlere Erregerstromstärke der Erregermaschine auf jeden beliebigen Wert zu regulieren. Allerdings hat die indirekte Beeinflussung der Erregung des Generators durch die gleichfalls mit Selbstinduktion behaftete Erregung der Erregermaschine eine Verzögerung der Regulierung zur Folge, es steht aber nichts im Wege, diesen ungünstigen Einfluß durch einen Spannungsüberschuß der Erregermaschine — also durch besonders kräftige Peitschenhiebe — zu kompensieren. Auf der anderen Seite wirken aber die verschiedenen induktiven Widerstände auch günstig auf die Regulierung. Denn trotz der stark schwankenden Spannung an den Klemmen der Wickelung der Erregermaschine sind die Pulsationen des Erregerstromes und die Erregerspannung schon wesentlich gedämpft, und die Stromstärke der Haupterregung und die Generatorspannung lassen bereits Schwankungen nicht mehr erkennen, welche die sehr empfindlichen Glühlampen sofort anzeigen würden.

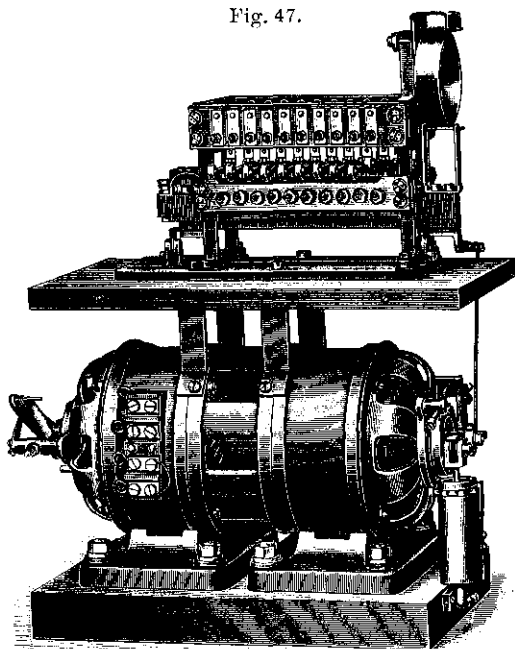
Ein Schnellregulator der unter 1 erwähnten Art¹⁾ ist der im Abschnitt 9 erläuterte Schnellregulator mit Stufenschalter der Siemens-Schuckertwerke, während der unter 2 kurz skizzierte Schnellregulator in zwei Ausführungen, dem Tirrillregulator der General Electric Co. (Abschnitt 10) (neuerdings auch von der British Thomson-Houston Co. und der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft hergestellt) und dem Schnellregulator mit periodisch kurz geschlossenem Erregerwiderstand der Siemens-Schuckertwerke (Abschnitt 11), vorliegt.

¹⁾ Vgl. auch D. R. P. 129 272 vom 3. Mai 1901, Regulator für Zugbeleuchtung von Alioth in Münchenstein bei Basel.

9. Der Schnellregulator mit Stufenschalter der Siemens-Schuckertwerke. (Fig. 47 bis 49.)

Das Steuerrelais (Fig. 47), welches den oberhalb gelagerten Stufenschalter betätigt, ist als Doppelrelais ausgeführt, da es nach Art der in Fig. 46 dargestellten Anordnung für mehrere Genera-

Fig. 47.



Schnellregulator mit Stufenschalter der S.-S.-W.

toren mit sehr verschiedener Charakteristik (langsam laufender Generator und Turbogenerator) dienen sollte, wobei jeder Generator sein eigenes Doppelrelais erhält. Als Relais sind Zweiphasen- bzw. Dreiphasen-Kurzschlußmotoren verwandt. Die Lagerreibung ist durch Verwendung von Kugellagern oder dünnen Achsen aus Stahldraht unter $\frac{1}{2}$ Proz. des normalen Drehmoments herabgedrückt. Der eine zweiphasig gewickelte Motor des Relais zeigt

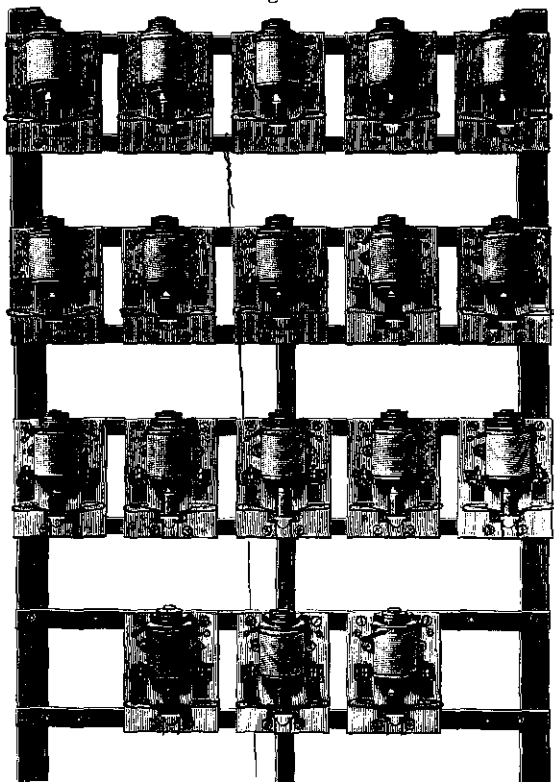
die Phasenverschiebung zwischen dem gesamten Netzstrom und dem Strom des betreffenden Generators an¹⁾) und ist in der schematischen Darstellung Fig. 49 der Übersichtlichkeit halber fortgelassen, der andere dreiphasig gewickelte Motor stellt das Spannungsrelais dar. Das Drehmoment desselben ist durch ein Federsystem ausbalanciert, dessen Moment innerhalb größerer Winkelausschläge konstant ist²⁾). Da der Regulator zwar möglichst leicht, aber doch nicht masselos herzustellen ist, so ist eine kleine Glyzerinpumpe zur Dämpfung von Pendelerscheinungen nicht zu entbehren. Durch einen Parallelkurbeltrieb wird der oberhalb der Motoren gelagerte Stufenschalter angetrieben. Dieser besteht aus einer um eine Horizontalachse drehbaren Kontaktlatte a , welche auf je zehn Kontakthebel rechts und links einwirkt. Die links stehenden Kontakthebel sind als Arbeitskontakte, die rechts stehenden als Ruhekontakte ausgebildet (in der schematischen Darstellung Fig. 49 sind nur je fünf Stück 1, 2 bis 5, 6, 7 bis 10 und statt der Latte ein radial stehender Kontaktarm a angenommen). Die Kontakthebel 1 bis 10 sind mit den Relaiswickelungen r_1 bis r_{10} verbunden. Jedes Relais schaltet eine Widerstandsstufe parallel zu den bereits eingeschalteten Widerständen im Erregerkreise; die Parallelschaltung ist gewählt, um die Strombelastung des einzelnen Kontaktes möglichst herabzudrücken und mit verhältnismäßig schwachem Relais große Stromstärken regulieren zu können. Hat sich die Latte a so weit als möglich nach rechts bewegt, so sind die Kontakte 6 bis 10 unterbrochen und sämtliche Relais stromlos. In diesem Falle ist in dem Stromkreise, der durch den Anker b der Erregermaschine, die Magnetwicklung und die Regulierwiderstände w gebildet wird,

¹⁾ Vgl. Fig. 46.

²⁾ Durch eine einzelne Feder ist dieses nicht möglich, wohl aber durch zwei Federn, welche unter verschiedenen Winkeln an einer Kurbel angreifen. Sind die Drehmomente der beiden Federn M_1 und M_2 , das Gesamtmoment $M (= M_1 + M_2)$ und ist die Kurbelstellung durch einen Winkel γ gegeben, so ist es möglich, die Konstanten so zu wählen, daß außer $\frac{dM}{d\gamma}$ auch noch $\frac{d^2M}{d\gamma^2}$, $\frac{d^3M}{d\gamma^3}$ usw. gleich Null werden. Selbst unter Annahme gewisser Einschränkungen gelingt es, solche Werte der Konstanten zu finden, bei denen zwischen der Momentenkurve und der Tangente in einem Punkte eine sechspunktige Berührung stattfindet.

nur der feste Widerstand w_{11} eingeschaltet. Bewegt sich die Latte a nach der Mittelstellung zu, so erhalten die Relaiswickelungen r_{10}, r_9 bis r_6 der Reihe nach Strom und es werden dadurch in gleicher Reihenfolge die Widerstände w_{10}, w_9 bis w_6 zu w_{11} parallel geschaltet. Bewegt sich die Latte weiter von der Mittel-

Fig. 48.

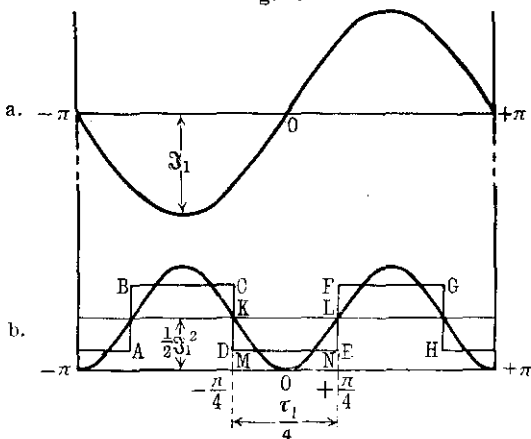


Zwischenrelais zum Schnellregulator mit Stufenschalter der S.-S.-W.

stellung nach links, so werden die Relais r_5, r_4 bis r_1 erregt und die Widerstände w_5, w_4 bis w_1 zu w_6 bis w_{11} parallel geschaltet, so daß zum Schluß sämtliche Relaiskontakte an der Stromführung beteiligt sind. Da ein Relais etwa 25 Ampere Strom führen kann, so würden die vorhandenen 20 Relais (in Fig. 48 sind zwei Stück

Lichtbetrieb bis herab zu 70 Polwechseln noch zulässig ist. Weitere periodische Spannungsschwankungen, die zu den natürlichen Stromschwankungen des Wechselstromes hinzutreten, sind daher auch bei 100 Polwechseln nur in ganz geringem Maße zulässig, wenn das Licht nicht flackern soll. Bei Gleichstrom liegen die Verhältnisse zwar günstiger, da die Energiezufuhr der Lampe bei konstanter Spannung in jedem Moment dieselbe ist, trotzdem ist aber der Regulator auch für Lichtbetrieb bei pulsierendem Gleichstrom ungeeignet, wie die nachfolgende vergleichende Rechnung zwischen einem Wechselstrom von 70 Polwechseln und einem pulsierenden Gleichstrom ergibt, wobei die Annahme gemacht

Fig. 50.



wird, daß die Temperaturschwankungen des Kohlefadens in beiden Fällen bei gleichem Energieüberschuß (Wattsekunden) über den mittleren Energiewert einander gleich sein werden.

Der Augenblickswert des Wechselstromes (Fig. 50 a) sei $I_1 \sin \alpha$, dann ist der Augenblickswert der Energiezufuhr (Fig. 50 b), wenn der Widerstand der Lampe = 1 gesetzt wird:

$$I_1^2 \sin^2 \alpha = I_1^2 \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} = \frac{I_1^2}{2} - \frac{I_1^2}{2} \cos 2\alpha,$$

also gleichfalls eine Sinusfunktion doppelter Wechselzahl, deren Abszissenachse um den Wert $\frac{I_1^2}{2}$ (die Amplitude) verschoben ist.

Der Mittelwert der Energiezufuhr ist gleich $\frac{\Im_1^2}{2}$. Die Erwärmung und Abkühlung des Kohlefadens würde nun die gleiche sein, wenn die Energiezufuhr nicht nach der Sinuskurve k , sondern nach dem gebrochenen Linienzug $ABCDEF GH$ stattfände, sofern die Fläche $DELK$ gleich der Fläche KLO ist. Nun ist

$$KLO = MNLK - MKOLN,$$

$$KLO = \frac{\pi}{2} \frac{\Im_1^2}{2} - \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} \Im_1^2 \sin \alpha^2 d\alpha = \Im_1^2 \frac{\pi}{4} - \Im_1^2 \left[\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4} \right]_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}}$$

$$KLO = \Im_1^2 \frac{\pi}{4} - \Im_1^2 \frac{\pi}{4} + \frac{\Im_1^2}{2} = \frac{\Im_1^2}{2}$$

$$KD = \frac{KLO}{\frac{\pi}{2}} = \frac{\Im_1^2}{\pi}.$$

Ist ν_1 die Periodenzahl, τ_1 die Zeitdauer einer Periode, so ist

$$\tau_1 = \frac{1}{\nu_1},$$

folglich die in der Zeit $\frac{\tau_1}{4}$ abgeführte Wärme:

$$\frac{\Im_1^2}{\pi} \frac{\tau_1}{4} = \frac{\Im_1^2}{4\pi\nu_1}.$$

In ähnlicher Weise sei der Augenblickswert des pulsierenden Gleichstromes (Fig. 51 a)

$$\Im_2 + \delta \Im_2 \sin \alpha,$$

wenn die Pulsationen durch den Faktor δ gegeben sind, welcher nur wenige Prozente betragen soll, und der Augenblickswert der Energiezufuhr (Fig. 51 b):

$$\Im_2^2 + 2\delta \Im_2 \sin \alpha + \delta^2 \Im_2^2 \sin^2 \alpha.$$

Das letzte Glied, in welchem δ^2 erscheint, verschwindet gegenüber dem zweiten Gliede und kann daher unberücksichtigt bleiben. Dann ist der Mittelwert der Energiezufuhr:

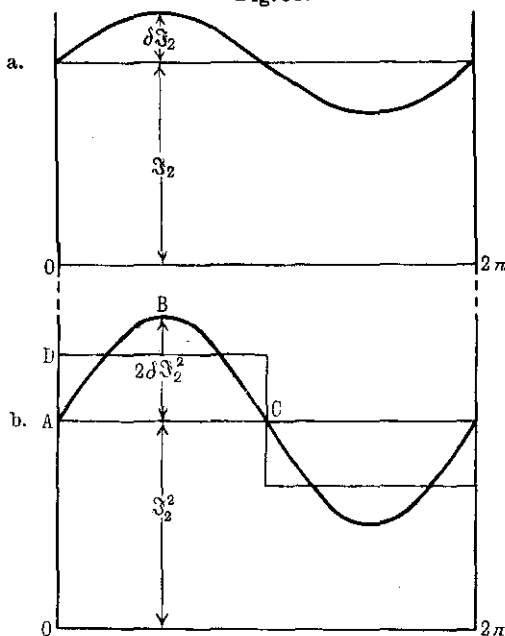
$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\mathfrak{I}_2^2 + 2\delta \mathfrak{I}_2^2 \sin \alpha) d\alpha = \frac{1}{2\pi} [\mathfrak{I}_2^2 \alpha - 2\delta \mathfrak{I}_2^2 \cos \alpha]_0^{2\pi} = \mathfrak{I}_2^2$$

und die Fläche

$$ABC = \int_0^{\pi} (\mathfrak{I}_2^2 + 2\delta \mathfrak{I}_2^2 \sin \alpha) d\alpha - \mathfrak{I}_2^2 \pi = 4\delta \mathfrak{I}_2^2$$

$$AD = \frac{ABC}{\pi} = \frac{4}{\pi} \delta \mathfrak{I}_2^2.$$

Fig. 51.



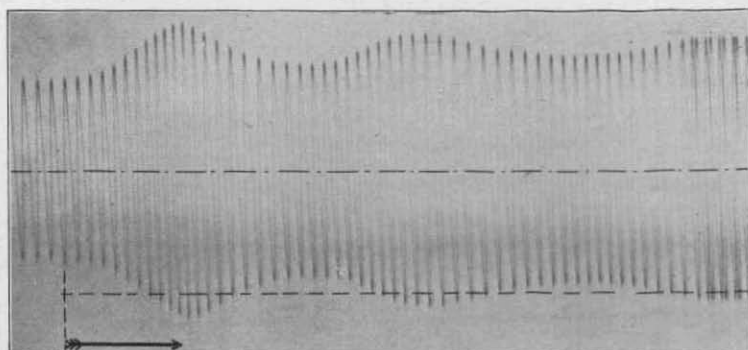
Ist ferner ν_2 die Periodenzahl, $\tau_2 = \frac{1}{\nu_2}$ die Dauer einer Periode, so ist der Überschuß an Wärmezufuhr in der Zeit $\frac{1}{2} \tau_2$:

$$\frac{4}{\pi} \delta \mathfrak{I}_2^2 \frac{\tau_2}{2} = \frac{2}{\pi} \frac{\delta \mathfrak{I}_2^2}{\nu_2}.$$

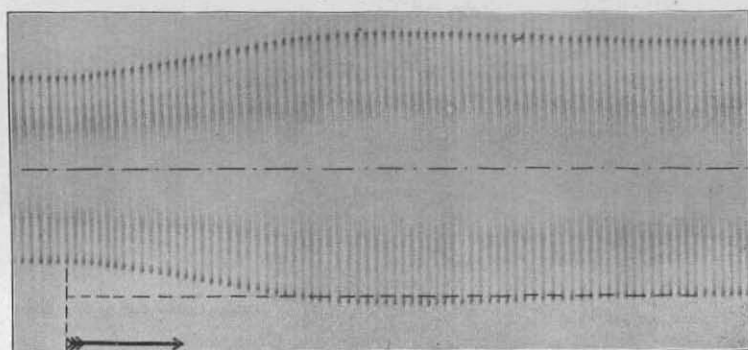
Es muß somit

$$\frac{2}{\pi} \frac{\delta \mathfrak{I}_2^2}{\nu_2} \leq \frac{\mathfrak{I}_1^2}{4\pi \nu_1}$$

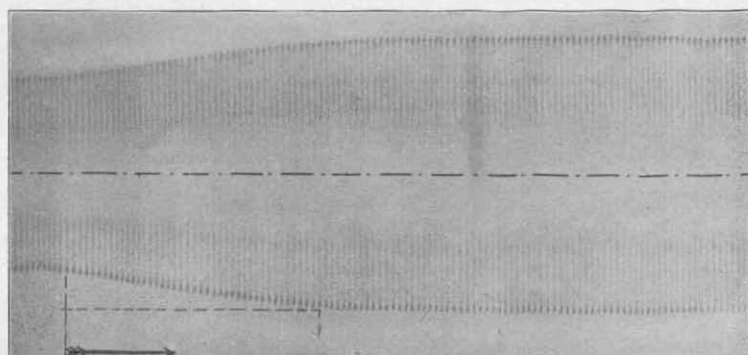
Fig. 52 a—c.



a. Dämpfung sehr schwach.



b. Dämpfung etwas zu schwach.



c. Dämpfung richtig.

Oszillographisch aufgenommene Regulierkurven für den Schnellregulator mit Stufenschalter (Fig. 47—49) bei verschieden eingestellter Dämpfung.

sein. Setzen wir die Mittelwerte der Energiezufuhr in beiden Fällen gleich, also

$$\frac{3_1^2}{2} = 3_2^2 \quad \text{und} \quad v_1 = 70,$$

so ist

$$v_2 \geq 4 \delta v_1 = 280 \delta.$$

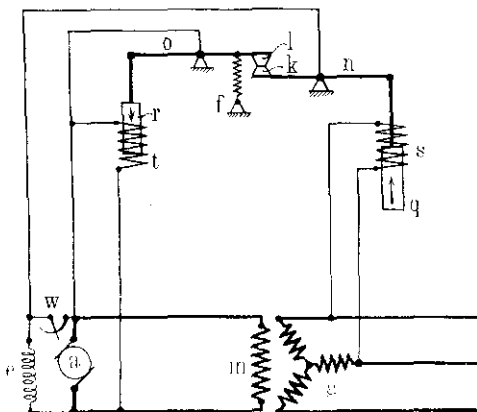
Setzen wir die Empfindlichkeit δ des Relais gleich ± 1 Proz., so erhalten wir bereits bei Gleichstrom eine geringste zulässige Schwingungszahl von 2,8 pro Sekunde. Bei Wechselstrom von 50 Perioden müßte die Schwingungszahl erheblich größer sein, und zwar nach angestellten Versuchen etwa 8 bis 10 pro Sekunde. Eine so große Schwingungszahl läßt sich aber bei den vorhandenen geringen Zugkräften, welche bei 1 Proz. Empfindlichkeit auch nur 1 bis 2 Proz. des Motordrehmoments betragen, nicht erreichen. Bei dem in Fig. 47 dargestellten Apparat beträgt die Schwingungszahl 1,5 pro Sekunde. Auch bei einer anderen Ausführungsform, bei der das Rotoreisen feststeht und nur der aus einem dünnen Metallrohr bestehende sehr leichte Anker drehbar angeordnet ist, ließ sich die Schwingungszahl nicht wesentlich erhöhen. Wenn somit auch die Verwendung dieses Regulators für Lichtbetrieb ausgeschlossen ist, so hat er sich für reinen Kraftbetrieb als Schnellregulator doch gut bewährt, indem er auftretende Spannungsschwankungen äußerst schnell ausreguliert. Die Kurven Fig. 52 a, b, c zeigen die Wirkungsweise dieses Regulators für eine Drehstromzentrale. In diesen Oszillogrammen sind die Spannungskurven vollständig aufgezeichnet, die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spitzen beträgt $\frac{1}{100}$ Sekunde. Bei der Aufnahme Fig. 52 a war die Wirkung der Dämpfungspumpe völlig ungenügend, so daß ein fünfmaliges Überregulieren eintrat; bei Fig. 52 b war die Dämpfung noch nicht ganz ausreichend, so daß einmaliges Überregulieren eintrat; in Fig. 52 c stellte sich bei richtig eingestellter Dämpfung die Spannung aperiodisch ein. Eine plötzliche Belastungszunahme von Leerlauf auf Vollast hatte ohne den Regulator einen Spannungsabfall von 40 Proz. zur Folge, nach Einschaltung desselben nur noch einen solchen von etwa 29 Proz. Fig. 52 c zeigt ferner, daß nach 40 Perioden, d. h. nach 0,8 Sekunden, die normale Spannung bereits wieder vorhanden war, ein Resultat, das jedenfalls beachtenswert ist.

10. Der Schnellregulator mit periodisch kurz geschlossenem Erregerwiderstand der General Electric Co., System Tirill.

In gleicher Form auch von der **British Thomson-Houston Co.** und der **Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft** ausgeführt¹⁾.

Dieser Regulator ist unter Fortlassung aller unwesentlichen Teile in Fig. 53 in vereinfachter Form schematisch dargestellt. Der auf konstante Spannung zu regulierende Generator ist mit g , seine Magnetwicklung mit m bezeichnet. Die letztere wird von

Fig. 53.

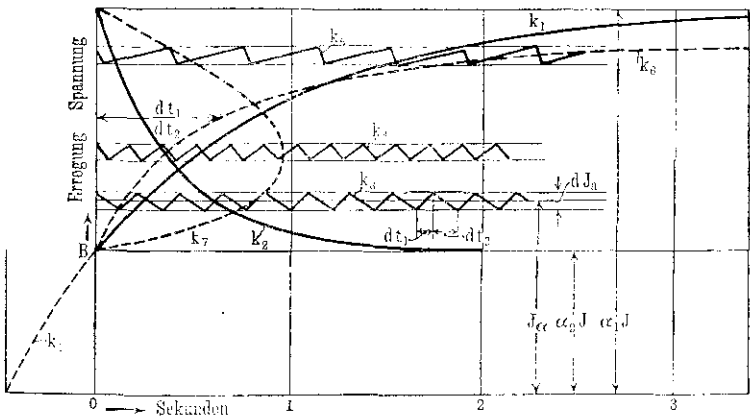


der Erregermaschine a gespeist, deren Erregerwicklung e unter Vorschaltung des Regulierwiderstandes w gleichfalls von a ihren Strom erhält. Der Regulierwiderstand w wird nun durch die Kontakte k, l des Schnellregulators periodisch kurz geschlossen, und zwar wird das Verhältnis der Dauer des Kurzschlusses zur Dauer der Unterbrechung durch den Apparat selbsttätig so reguliert, daß der die Wicklung e durchfließende Erregerstrom eine für die Konstanthaltung der Generatorspannung gerade erforderliche mittlere Erregerspannung zur Folge hat. Der mittlere

¹⁾ Vgl. D. R. P. 158 415 vom 16. Oktober 1902 und 183 254 vom 29. März 1905. Electrical World and Engineer 1903, S. 236. Elektrot. Zeitschr. 1903, S. 795; 1904, S. 923; 1906, S. 324; 1907, S. 1202. Niethammer, Elektrische Schaltanlagen u. Apparate, 1905, S. 31.

Erregerstrom kann alle Werte zwischen dem geringsten bei dauernd offenem und dem größten bei dauernd kurz geschlossenem Widerstande annehmen. Die Bewegung der Kontakte k, l , welche von den Hebeln n, o getragen werden, geschieht durch die Elektromagnetanker q, r , welche in der Richtung der Pfeile $\uparrow \downarrow$ in die Spulen s, t hineingezogen werden. Die Spule s liegt an einer Phase des Generators und stellt das Spannungsrelais dar, die Spule t liegt an den Ankerklemmen der Erregermaschine und erhält einen periodisch schwankenden Strom, welcher eine ebenso periodisch schwankende Zugkraft zur Folge hat. Eine Feder f gleicht das Ankergewicht r und die mittlere Zug-

Fig. 54.



kraft der Spule t aus. Denken wir uns zunächst einen stationären Zustand (konstante Belastung und konstante Spannung des Generators g), so steht der Kontakt k fest, während der Magnetanker r regelmäßige Schwingungen macht. Diese erfolgen — in ähnlicher Weise wie bei einem Neef'schen Hammer — dadurch, daß bei geschlossenem Kontakt $k1$ die Ankerspannung so hoch ansteigt, daß der Elektromagnet rt die Kontakte unterbricht und daß bei offenem Kontakt $k1$ die Spannung so weit sinkt, daß sich die Kontakte wieder schließen. Die hierbei auftretenden Vorgänge mögen an Hand der Fig. 54 und unter Zugrundelegung der auf S. 5 gewählten Bezeichnungen erläutert werden. Bei dauernd geschlossenem Kontakt $k1$ sei die Erregerstromstärke $\alpha_1 J$, bei

dauernd geöffnetem Kontakt $\alpha_2 J$. Nach dem Schließen des Kontaktes steigt der Strom nach der Kurve k_1 an, welche jedoch erst von dem Punkte B an in Frage kommt; nach dem Öffnen des Kontaktes fällt die Stromstärke nach der Kurve k_2 . Macht der Regulator für einen stationären Belastungszustand regelmäßige periodische Schwingungen, so ändert sich die Stromstärke nach den eingezeichneten Zickzacklinien k_3, k_4, k_5 , die sich aus Teilen der Kurven k_1 und k_2 zusammensetzen, indem der Strom während des Zeitelementes dt_1 nach der Kurve k_1 ansteigt und während des Zeitelementes dt_2 nach der Kurve k_2 abfällt. (Bei genügend großer Schwingungszahl können diese Zeitelemente als unendlich klein angenommen werden.) Dabei tritt ein mittlerer Strom J_a auf, der periodisch um den Betrag dJ_a schwankt.

Die Scheitelpunktsgleichung der Kurve k_1 ist (nach Gleichung 2 bzw. 3, S. 6 und 7):

$$J_a = \alpha_1 J (1 - e^{-\frac{t_1}{\alpha_1 T}}); \quad e^{-\frac{t_1}{\alpha_1 T}} = \frac{\alpha_1 J - J_a}{\alpha_1 J}$$

$$\frac{dJ_a}{dt_1} = \frac{J}{T} e^{-\frac{t_1}{\alpha_1 T}} = \frac{\alpha_1 J - J_a}{\alpha_1 T}.$$

Die Scheitelpunktsgleichung der Kurve k_2 ist (nach Gleichung 5, S. 8):

$$J'_a = \alpha_2 J + J (1 - \alpha_2) e^{-\frac{t_2}{\alpha_2 T}}; \quad (1 - \alpha_2) e^{-\frac{t_2}{\alpha_2 T}} = \frac{J'_a - \alpha_2 J}{J}$$

$$\frac{dJ'_a}{dt_2} = -\frac{J}{\alpha_2 T} (1 - \alpha_2) e^{-\frac{t_2}{\alpha_2 T}} = -\frac{J'_a - \alpha_2 J}{\alpha_2 T}.$$

Für einen stationären Zustand ist nun:

$$dJ_a = -dJ'_a \quad \text{und} \quad J_a = J'_a,$$

folglich ist

$$\frac{dt_1}{dt_2} = \frac{\alpha_1 T}{\alpha_1 J - J_a} \frac{J_a - \alpha_2 J}{\alpha_2 T} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{J_a - \alpha_2 J}{\alpha_1 J - J_a}.$$

Es gehört daher zu jedem Wert J_a ein ganz bestimmter Wert von $\frac{dt_1}{dt_2}$.

Die Kurve k_6 stellt $\frac{dt_1}{dt_2} = f(J_a)$ dar. Es ist aus obiger Gleichung leicht zu ersehen, daß es eine Kurve zweiter Ordnung,

und zwar eine Hyperbel ist. Der Wert $\frac{dt_1}{dt_2}$ nimmt für beliebige Werte von J_α zwischen $\alpha_2 J$ und $\alpha_1 J$ alle endlichen Werte zwischen 0 und ∞ an. Wenn daher umgekehrt durch irgend welche äußeren Mittel ein bestimmter Wert der Takteinteilung $\frac{dt_1}{dt_2}$ erzwungen wird, so wird sich auch ein ganz bestimmter mittlerer Strom J_α , der dem Werte von $\frac{dt_1}{dt_2}$ entspricht, einstellen. Die Schwingungszahl selbst des schwingenden Systems ist hierbei nebensächlich, es kommt vielmehr nur auf die Einteilung der Schwingung, also auf das Verhältnis

$$\frac{dt_1}{dt_2} = \frac{\text{Dauer des Kontaktschlusses}}{\text{Dauer der Unterbrechung}}$$

an. Es entspricht aber jedem bestimmten Wert von J_α auch eine ganz bestimmte Schwingungszahl, die sich folgendermaßen berechnen läßt: Es ist

$$dt_1 = dJ_\alpha \frac{\alpha_1 T}{\alpha_1 J - J_\alpha}; \quad dt_2 = -dJ'_\alpha \frac{\alpha_2 T}{J'_\alpha - \alpha_2 J}$$

worin $dJ_\alpha = -dJ'_\alpha$ und $J_\alpha = J'_\alpha$ ist.

$$\begin{aligned} \frac{dt_1 + dt_2}{dJ_\alpha} &= T \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 J - J_\alpha} + \frac{\alpha_2}{J_\alpha - \alpha_2 J} \right) \\ &= T \frac{\alpha_1 (J_\alpha - \alpha_2 J) + \alpha_2 (\alpha_1 J - J_\alpha)}{(\alpha_1 J - J_\alpha) (J_\alpha - \alpha_2 J)} \\ \frac{dJ_\alpha}{dt_1 + dt_2} &= \frac{1}{T} \frac{(\alpha_1 J - J_\alpha) (J_\alpha - \alpha_2 J)}{\alpha_1 (J_\alpha - \alpha_2 J) + \alpha_2 (\alpha_1 J - J_\alpha)} \\ &= \frac{(\alpha_1 J - J_\alpha) (J_\alpha - \alpha_2 J)}{T(\alpha_1 - \alpha_2) J_\alpha} \end{aligned}$$

$\frac{1}{dt_1 + dt_2}$ ist die Schwingungszahl des Systems, welche hier im Verhältnis zu dJ_α angegeben ist. Kurve k_7 stellt

$$\frac{dJ_\alpha}{dt_1 + dt_2} = f(J_\alpha)$$

dar. Die Gleichung läßt erkennen, daß auch diese Kurve eine Kurve zweiter Ordnung, und zwar eine Hyperbel ist. Jedem Werte von J_α entspricht somit eine bestimmte Schwingungszahl,

dagegen entsprechen einem Werte der Schwingungszahl zwei Werte von J_a . Die Schwingungszahl wird für $J_a = \alpha_1 J$ und $J_a = \alpha_2 J$ gleich Null und bei konstantem Wert von dJ_a für $J_a = J \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}$ ein Maximum.

In Fig. 54 ist $\alpha_1 = \frac{8}{8}$, $\alpha_2 = \frac{3}{8}$ und $J = 1$ und $T = 1$ angenommen. Unter diesen Voraussetzungen ist:

$$\frac{dt_1}{dt_2} = \frac{\frac{8}{8} J_a - \frac{3}{8}}{1 - J_a}$$

und

$$\frac{dJ_a}{dt_1 + dt_2} = \frac{(1 - J_a)(J_a - \frac{3}{8})}{\frac{5}{8} J_a}.$$

Hiernach ergeben sich für verschiedene Werte von J_a folgende Werte von $\frac{dt_1}{dt_2}$ und $\frac{dJ_a}{dt_1 + dt_2}$:

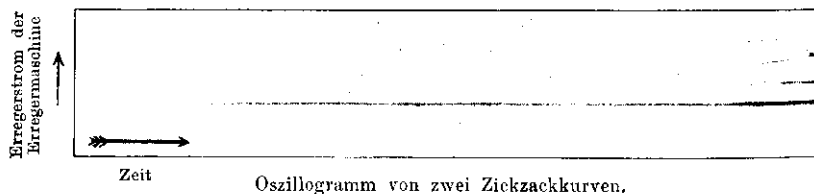
J_a	$\frac{3}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{8}{8}$
$\frac{dt_1}{dt_2}$	0,000	0,667	1,78	4,00	10,67	∞
$\frac{dJ_a}{dt_1 + dt_2}$	0,000	0,200	0,240	0,200	0,114	0,000

Das Maximum der Schwingungszahl liegt bei

$$J_a = \frac{\sqrt{3 \cdot 8}}{8} = \frac{4,9}{8}.$$

Fig. 55 stellt zwei mit dem Oszillographen aufgenommene Kurven dar, von denen die obere etwa der Kurve k_5 , die untere der Kurve k_4 in Fig. 54 entspricht.

Fig. 55.



Oszillogramm von zwei Zickzackkurven.

Die jeweilig erforderliche Takteinteilung $\left(\frac{dt_1}{dt_2}\right)$ wird nun erzielt durch Änderung der Federspannung f , und zwar ist die

Änderung in sehr geistreicher Weise auf indirektem Wege erzielt, indem bei zu geringer Spannung durch das Spannungsrelais s der Kontakt k gehoben und dadurch der Kontakt l veranlaßt wird, in einem höheren Niveau zu spielen.

Im nachfolgenden soll nun näher erläutert werden, weshalb eine Änderung der Federspannung eine Änderung der Takteinteilung zur Folge hat. Die periodischen Schwingungen des Hebels o (Fig. 53) werden in erster Linie hervorgerufen durch die Stromschwankungen in der Spule t . Diesen Stromschwankungen entsprechen Schwankungen der auf den Ankerkern r ausgeübten Zugkräfte, welche letzteren proportional dem Quadrat der jeweiligen Stromstärke sind. Die Zugkräfte können daher durch eine Zackenkurve dargestellt werden, die einen ganz ähnlichen Verlauf hat wie die Kurven k_3 bis k_5 der Fig. 54. Der mittleren Zugkraft von r wird durch die Feder f das Gleichgewicht gehalten. Die Schwingungsdauer wird, wie bei einem Pendel, hauptsächlich durch das Trägheitsmoment der bewegten Massen bestimmt. Es sind aber noch eine ganze Reihe weiterer Einflüsse vorhanden, welche eine Änderung der Schwingungen hervorrufen: Der elastische Rückdruck des von einer Blattfeder getragenen Kontaktes k , die Achsenreibung und der Luftwiderstand, hierzu treten noch eine Reihe von Einflüssen, welche eine zeitliche Verschiebung der magnetischen Zugkräfte von t zur Folge haben; der Magnetismus in den massiven Schenkeln der Erregermaschine folgt den Stromschwankungen der Erregerwicklung in e nicht momentan, sondern ist durch die in den Schenkeln auftretenden Wirbelströme um einen kleinen Betrag in der Phase verschoben, das gleiche gilt, wenn auch in viel geringerem Grade, von der Ankerspannung. Da ferner die Spule t eine gewisse Selbstinduktion besitzt, so ist auch in ihr der Strom in der Phase gegen die Spannung verschoben.

Schließlich wird der Widerstand w in der Regel nicht durch die Kontakte kl direkt, sondern durch ein Zwischenrelais (vgl. Fig. 58 bis 60) kurz geschlossen, wodurch eine weitere zeitliche Verschiebung hervorgerufen wird. Diese verschiedenen Einwirkungen sind durchaus nicht von untergeordneter Bedeutung, sondern beeinflussen die Schwingungen in ganz erheblichem Maße und sind sogar zur Hervorbringung der Schwingungen unumgänglich nötig; denn es ist leicht nachzuweisen, daß die in Fig. 54 dargestellten

Zackenkurven k_3, k_4, k_5 freie, durch keinerlei feste oder federnde Anschläge begrenzte Schwingungen nicht hervorrufen können, da innerhalb der ersten Hälfte von dt_1 nur beschleunigende Kräfte und erst während des zweiten Teiles $\frac{dt_1}{2}$ gleich große verzögernde Kräfte auftreten, während zur Hervorbringung der Schwingung während einer Halbperiode die verzögernden Kräfte bzw. Kräfte gleicher Richtung überwiegen müssen (man denke z.B. an eine einfache Pendelschwingung).

Die Summe aller Kräfte, welche in jedem Moment auf das schwingende System einwirken, sei in Fig. 56 a durch die Kurve k als Funktion der Zeit dargestellt, $P_x = f(x)$. P sei die während der Schwingung konstant angenommene Federspannung. Da die Schwingungszeit nunmehr als endliche Größe betrachtet wird, so wird nachfolgend statt dt_1 und dt_2 t_1 und t_2 geschrieben.

Setzen wir ferner die Masse des bewegten Systems gleich 1, so bedeutet P_x auch die jeweilige Beschleunigung. Da ferner die Änderung der Geschwindigkeit $dv = P_x dx$ ist, so ist (Fig. 56 b) die Geschwindigkeit nach der Zeit x :

$$v_x = v_1 - \int_0^x P_x dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

und die Abnahme der Geschwindigkeit in der Zeit t_1 gleich der Fläche $ABCD$ (Fig. 56 a) oder:

$$v_2 = v_1 - \int_0^{t_1} P_x dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

ebenso ist

$$v_1 = v_2 - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

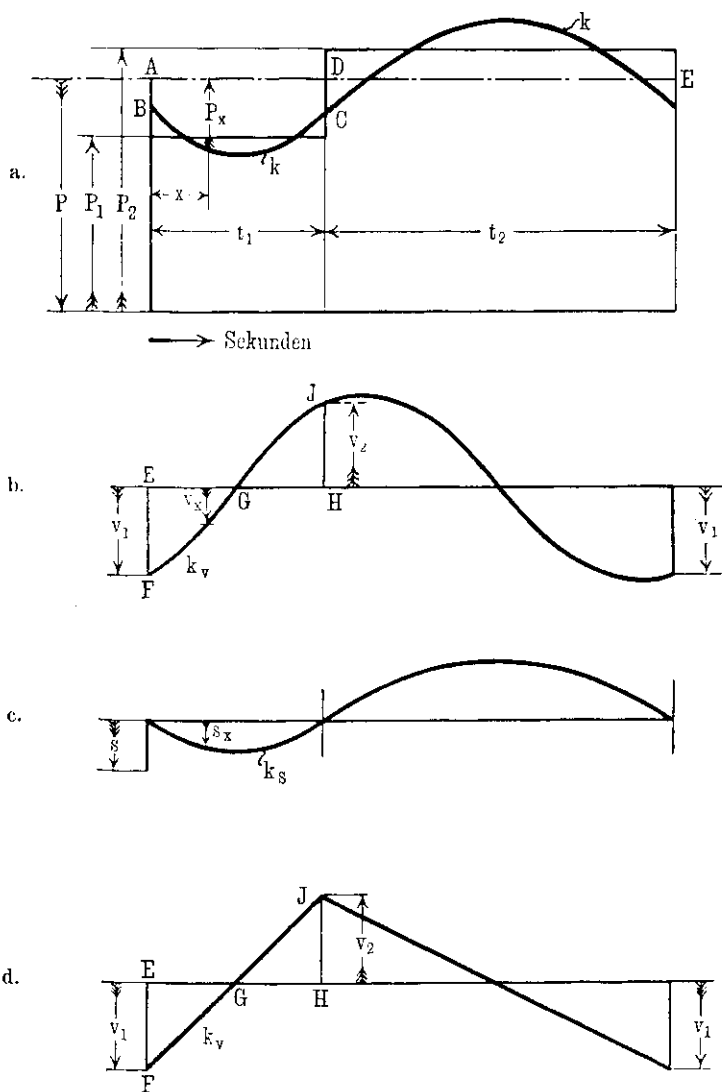
und

$$\int_0^{t_1} P_x dx + \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Der in der Zeit x zurückgelegte Weg s_x (Fig. 56 c) ist, wenn wir den zur Zeit $x = 0$ zurückgelegten Weg gleich Null setzen:

$$s_x = \int_0^x v_x dx.$$

Fig. 56 a—d.



Nach den Zeiten t_1 und $t_1 + t_2$ soll der Weg $= 0$ sein, es ist daher

$$s_1 = s_2 = 0 = \int_0^{t_1} v_x dx = \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} v_x dx 5)$$

Wir nehmen nun zunächst zur Vereinfachung der Rechnung an, daß die Kurve k für die Resultante der Kräfte in Fig. 56 a innerhalb der Zeit t_1 , wie auch innerhalb der Zeit t_2 (ähnlich wie bei einem Pendel) symmetrisch verläuft, und daß ferner die Geschwindigkeit bei der Berührung und bei der Unterbrechung der Kontakte gleich groß, aber entgegengesetzt ist.

$$v_1 = -v_2 = +v.$$

Dann verläuft die Geschwindigkeitskurve k_v symmetrisch in bezug auf den Punkt G und es ist nach Gleichung 2) und 3):

$$\int_0^{t_1} P_x dx = v_1 - v_2 = 2v = - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx 6)$$

Infolge des symmetrischen Verlaufes der Kurve k_v (Fig. 50 b) verläuft auch die Wegkurve k_s symmetrisch. Der nach der Zeit t_1 zurückgelegte Weg ist gleich der algebraischen Summe der Flächen EFG und GHH , also $= 0$. Dieselben Erwägungen lassen sich für die Zeit t_2 anwenden.

Wir wollen nun die veränderliche Kraft P_x (Fig. 56 a) ersetzen durch eine Kraft $P - P_1$, welche während der Zeit t_1 , und eine zweite Kraft $-(P_2 - P)$, welche während der Zeit t_2 konstant wirkt. Die Kräfte P_1 und P_2 sollen so gewählt werden, daß sie dieselben Endgeschwindigkeiten $v_1 = -v_2 = v$ und dieselben Endwege $s_1 = s_2 = 0$ zur Folge haben, dann hat die Geschwindigkeitskurve k_v (Fig. 56 d) einen geradlinig gebrochenen Verlauf und nach Gleichung 2) und 6) ist

$$2v = (P - P_1)t_1 = (P_2 - P)t_2 = \int_0^{t_1} P_x dx = - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx 7)$$

und

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{P_2 - P}{P - P_1} 8)$$

Daß die zurückgelegten Wege nach den Zeiten t_1 bzw. t_2 gleich Null sind, war bereits allgemein für einen symmetrischen

Verlauf der Kurve k nachgewiesen, gilt also auch für die Kurven $P_x = P - P_1 = \text{Konstans}$ und $P_x = -(P_2 - P) = \text{Konstans}$. Die Kraftdifferenz $P_2 - P_1$, welche die Schwingungen des Systems veranlaßt und deren Betrag verhältnismäßig gering sein wird, können wir als konstant oder wenigstens nahezu konstant annehmen; dann aber geht aus Gleichung 8) hervor, daß durch eine Veränderung des Wertes P innerhalb der Grenzen P_1 und P_2

$$P_1 < P < P_2$$

jedes beliebige Taktverhältnis $\frac{t_1}{t_2}$ zwischen

$$\frac{t_1}{t_2} = 0 \quad \text{für } P = P_2$$

und

$$\frac{t_1}{t_2} = \infty \quad \text{für } P = P_1$$

erzielt werden kann. Einer Verschiebung der Linie ADE in Fig. 56 a nach aufwärts (Vergrößerung von P) entspricht daher eine Verschiebung der Linie DC nach links (Verkleinerung von t_1/t_2) und umgekehrt.

Derselbe Beweis läßt sich führen, wenn wir die vereinfachten Annahmen fallen lassen und die Rechnung für einen beliebigen Verlauf der Kurve k (Fig. 57) und beliebige Endgeschwindigkeiten v_1 und v_2 durchführen.

Die Kurve k (Fig. 57 a), sowie die daraus entwickelten Kurven k_v (Fig. 57 b) und k_s (Fig. 57 c) müssen jedoch für einen stationären Schwingungszustand folgenden Bedingungen genügen: Nach Gleichung 4) ist

$$\int_0^{t_1} P_x dx + \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Ferner nach Gleichung 2) und 3)

$$2(v_1 - v_2) = \int_0^{t_1} P_x dx - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

Oder nach Gleichung 9)

$$v_1 - v_2 = \int_0^{t_1} P_x dx = - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} P_x dx \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

und nach Gleichung 1) und 5)

$$s_1 = 0 = \int_0^{t_1} (v_1 - \int_0^x P_x dx) dx = v_1 t_1 - \int_0^{t_1} dx \int_0^x P_x dx \quad 12)$$

$$s_2 = 0 = v_2 t_2 - \int_{t_1}^{(t_1+t_2)} dx \int_0^x P_x dx.$$

Wir ersetzen nunmehr wieder die veränderliche Kraft P_x durch zwei konstante Kräfte $(P - P_1)$ und $-(P_2 - P)$ (Fig. 57 a), die aber nicht während der ganzen Zeitintervalle t_1 und t_2 , sondern nur in den Zeiten u_1 und u_2 ¹⁾ wirken, aber dieselben Endgeschwindigkeiten v_1 , v_2 und dieselben Bewegungen $s_1 = 0$ und $s_2 = 0$ bewirken sollen wie die veränderliche Kraft P_x .

Dann verläuft die Geschwindigkeitskurve k_v nach dem Linienzuge Fig. 57 d. Sollen nun die Wege s_1 und s_2 gleich Null sein, so muß die Summe der nachfolgend angegebenen Flächen, welche dem Integral $\int v_x dx$ entsprechen, gleich Null sein:

$$ABCD - DEF = 0 = ABLF - LCE$$

$$GHJK - EFG = 0 = FLJH - ELK$$

oder

$$v_1 t_1 - u_1 \frac{v_1 - v_2}{2} = 0$$

$$v_1 t_2 - u_2 \frac{v_1 - v_2}{2} = 0$$

$$u_1 = \frac{2 v_1 t_1}{v_1 - v_2}; \quad u_2 = \frac{2 v_1 t_2}{v_1 - v_2} \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{t_1}{t_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

Nun muß aber nach Gleichung 4)

$$u_1 (P - P_1) = u_2 (P_2 - P)$$

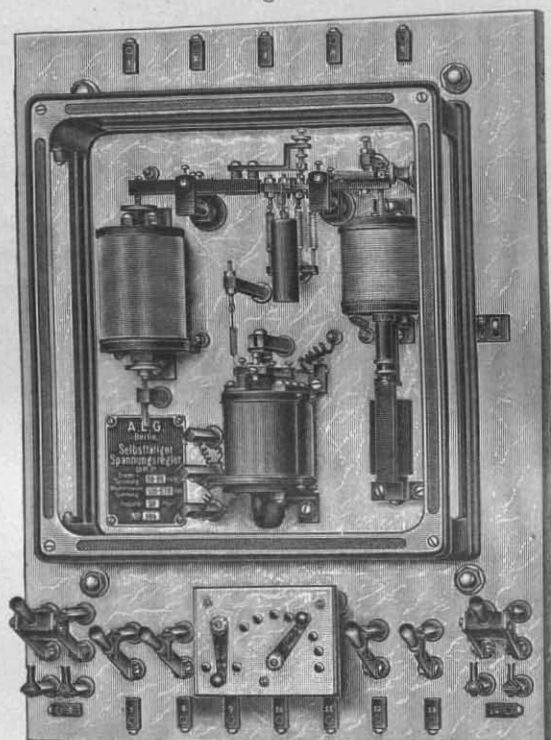
sein, folglich ist:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{P_2 - P}{P - P_1}.$$

¹⁾ In der Fig. 57 a ist angenommen, daß u_1 und u_2 in der Mitte aneinanderstoßen, es könnte aber ebensogut u_1 nach links und u_2 nach rechts verschoben sein. Die Verschiebung einer der beiden Strecken allein ist dagegen ausgeschlossen.

Hiermit ist bewiesen, daß jede beliebige stationäre Schwingung ersetzt werden kann durch eine Schwingung, welche durch zwei konstante, während der Zeiten u_1 bzw. u_2 wirkende Kräfte $(P - P_1)$ und $-(P_2 - P)$ erzeugt wird, und daß auch bei einer solchen, durch unsymmetrisch verteilte Kräfte erzeugten, Schwin-

Fig. 58.

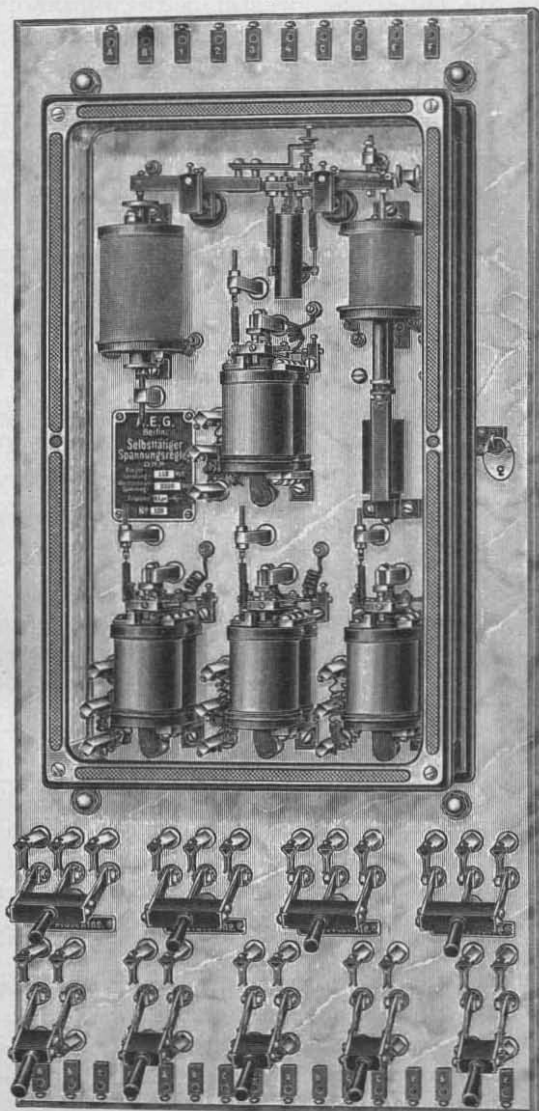


Tirrill-Regulator der A. E. G. mit einem Zwischenrelais.

gung sich jede Takteinteilung $\frac{t_1}{t_2}$ zwischen 0 und ∞ durch eine Veränderung der Kraft P zwischen P_2 und P_1 einstellen läßt. Dieses geschieht bei dem Regulator, wie bereits erwähnt, durch verschiedene Anspannung der Feder f (Fig. 53).

Der Regulator zeigt noch eine ganze Reihe von Eigentümlichkeiten, die an Hand der Fig. 58, 59 für einen Regulator mit

Fig. 59.

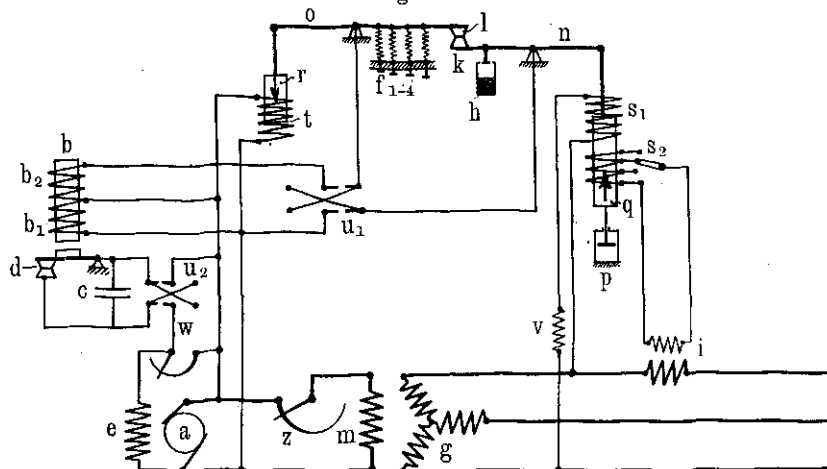


Tirrill-Regulator der A. E. G. mit vier Zwischenrelais.

1 bzw. 4 Zwischenrelais und der ausführlicheren schematischen Darstellung Fig. 60 erläutert werden mögen. Zunächst ist zu erwähnen, daß die mittlere Zugkraft der Spule t nicht durch eine einzige Feder ausbalanciert ist, sondern durch vier Federn f_1, f_2, f_3, f_4 , welche sämtlich an dem Hebel o in bestimmter Reihenfolge nacheinander angreifen ¹⁾.

Die Spannung der Erregermaschine a , an der auch die Spule t liegt, ist nämlich nicht konstant, sondern steigt etwa linear mit der Belastung des Generators g . Ist nun die Feder f für einen bestimmten Belastungszustand gleich der mittleren Zugkraft von t ,

Fig. 60.



so würde für einen anderen Belastungszustand der Kern tiefer in die Spule hineingezogen und die Feder mehr gespannt werden. Da aber die Zugkraft der Spule etwa quadratisch mit ihrem Strom oder der Erregerspannung, die Kraft einer Feder aber nur linear mit dem Hube zunimmt, so würde der Kern bei einer Zunahme der Erregerspannung im Anfang wenig, zum Schluß aber unverhältnismäßig tief in die Spule hineingezogen werden. Das würde aber ein größeres Spiel der beiden Hebel o und n und schädliche Massenbewegungen zur Folge haben. Soll daher die Höherstellung

¹⁾ Entgegen der Darstellung Fig. 60 kommt zunächst die Feder f_4 und dann der Reihe nach die Federn f_1, f_2, f_3 zur Wirkung.

Hub	Federspannung in Gramm				
	Feder 1	2	3	4	Summe
0,6 mm	$130 \left(0,6 - 0,6 + \frac{36}{130} \right) = 36$	0	0	0	36
0,7	$130 \left(0,7 - 0,6 + \frac{36}{130} \right) = 49$	0	0	0	49
0,8	$130 \left(0,8 - 0,6 + \frac{36}{130} \right) = 62$	2	0	0	64
0,9	$130 \left(0,9 - 0,6 + \frac{36}{130} \right) = 75$	4	2	0	81
1,0	$130 \left(1,0 - 0,6 + \frac{36}{130} \right) = 88$	6	4	2	100

Die Werte der letzten Kolumne stimmen mit den in der ersten Tabelle angegebenen Werten genau überein. Zwischen zwei Knickpunkten, z. B. 0,6 und 0,7 mm, steigt die Federspannung nach der Sehne, welche sich aber der Parabel sehr eng anschmiegt. Bedingung für ein richtiges Arbeiten ist, daß die Federn f_2, f_3, f_4 an ihren Enden nicht fest eingespannt sind, sondern daß sie bei Unterschreitung der Spannung 0 schlaff werden können. Die Federn werden in der Weise einjustiert, daß eine Feder nach der anderen so stark angespannt wird, daß beim Ansteigen des Stromes der Spule t um gleiche Beträge der Hebel o am rechten Ende um gleiche Wege angehoben wird. Die ganze Hubdifferenz des Kontaktes l zwischen Leerlauf und Vollbelastung beträgt etwa nur 1 bis 1,5 mm und die Amplitude der Schwingung etwa 0,1 bis 0,3 mm.

Zum Kurzschließen des Widerstandes w dient das Zwischenrelais b, d (Fig. 60). Dieses Relais ist mit einer Doppelwicklung b_1, b_2 versehen, ähnlich wie der Magnet des Hughesschen Drucktelegraphen. Die Wicklung b_1 wird ständig von der Erregermaschine gespeist, während die entgegengesetzt wirkende Wicklung b_2 durch die Kontakte k, l gesteuert wird.

Beim Schließen der Kontakte k, l läßt der Anker des Zwischenrelais los. Der Kontakt d ist daher zur selben Zeit geschlossen wie der Kontakt k, l . Die Wirkung ist somit die gleiche, als wenn der Widerstand w direkt durch die Kontakte k, l kurzgeschlossen würde. Parallel zu dem Kontakt d ist der Konden-

sator c geschaltet, um die Funken an diesem Kontakt möglichst zu unterdrücken.

Die Umschalter u_1, u_2 dienen dazu, die Stromrichtung in den Kontakten k, l und d etwa täglich einmal umkehren zu können, wodurch die Abnutzung derselben gleichmäßiger wird.

Der Anker q des Spannungsrelais wird durch zwei Wickelungen s_1 und s_2 beeinflusst, deren erstere, die Spannungswicklung s_1 , zusammen mit dem Vorschaltwiderstand v an einer Phase der Netzspannung liegt, während die zweite, die Hauptstromwicklung s_2 , von dem Stromtransformator i gespeist wird. Im allgemeinen ist die Einwirkung zweier Wechselstromwickelungen auf denselben Eisenkern unzulässig, da der magnetische Fluß einer widerstandslosen Spannungswicklung unveränderlich ist. Im vorliegenden Falle ist aber die Stromaufnahme der Spule s_1 durch den Vorschaltwiderstand v begrenzt, während der induktive Widerstand verhältnismäßig gering ist. Die Phasen der die beiden Wickelungen durchfließenden Ströme sind so gewählt, daß sie nahezu um 180° verschoben sind, also sich entgegenwirken. Die Spule s_2 , deren Windungszahl überdies nach Wunsch verändert werden kann, wirkt daher kompoundierend¹⁾. Wählt man den Vorschaltwiderstand v so groß, daß die Spule s_1 etwa nur den sechsten Teil der Gesamtspannung erhält, so ist die Stromaufnahme von v und s_1 fast unabhängig von der Frequenz. Dadurch erhält aber der Regulator die sehr wertvolle Eigenschaft, auch bei einer starken Abnahme der Umdrehungszahl der Antriebsmaschine die Spannung nahezu konstant zu halten. Unter der obigen Annahme würde z. B. bei einer Abnahme der Umdrehungszahl um 20 Proz. die Spannung nur um etwa 1 Proz. sinken. Der Hebel n trägt auf der linken Seite ein mit Schrotkörnern gefülltes Belastungsgewicht h , durch dessen Vergrößerung der Apparat auf höhere Spannung reguliert. Der Anker q ist ferner noch mit dem Kolben der Dämpfungspumpe p verbunden, die dazu dient, Pendelbewegungen des Hebels n , welche durch die Stromwechsel verursacht werden, zu unterdrücken. Die Notwendigkeit, eine derartige Dämpfungspumpe verwenden zu müssen, stellt allerdings scheinbar eine Schwäche dieses Regu-

¹⁾ Wird auf die Kompoundierung verzichtet, so können die Wickelungen s_1 und s_2 in Hintereinanderschaltung an die Spannung gelegt werden, wodurch die Spannung um $\pm 7,5$ Proz. verändert werden kann.

lators dar, denn bei oberflächlicher Betrachtung könnte man annehmen, daß die Dämpfung die „Schnelligkeit“ der Regulierung nur schädlich beeinflusst. Kann aber die Dämpfung so schwach eingestellt werden, daß bei einem Belastungsstoß und dem damit verbundenen Spannungsabfall des Generators der Kontakt k etwas schneller sich nach aufwärts bewegen will als der Kontakt l , dessen Geschwindigkeit durch die Selbstinduktion der Erregerwicklung e begrenzt ist, so bleiben die Kontakte k, l in dauernder Berührung, und die Regulierung erfolgt so schnell, als es überhaupt möglich ist. Dieses trifft natürlich nur für einen bestimmten Fall zu, und die Dämpfung wirkt daher, wenn auch in sehr geringem Maße immerhin noch schädlich. Die Anordnung von zwei beweglichen Hebeln n, o , welche sich gegenseitig in ihren Bewegungen stören können und zweifellos eine stärkere Einstellung der Dämpfung erfordern, ist vielleicht ein kleiner Nachteil dieses Regulators. Die Wirkungsweise des Regulators ist gleichwohl eine sehr befriedigende. Jedenfalls war dieser Regulator der erste praktisch ausprobierte, der den Namen Schnellregulator verdient.

Um den Schnellregulator außer Tätigkeit zu setzen, schließt man den Nebenschlußregulator w zunächst so weit kurz, bis das Hauptrelais, sowie das Zwischenrelais aufhören zu spielen; bei dem weiteren Kurzschließen von w ist gleichzeitig der vorher kurz geschlossene Erregerregulator z vorzuschalten.

11. Die Schnellregulatoren mit periodisch kurz geschlossenem Erregerwiderstand der Siemens-Schuckertwerke ¹⁾.

Dieser Schnellregulator unterscheidet sich in seinen verschiedenen Entwicklungs- und Ausführungsformen von dem vorhergehenden hauptsächlich dadurch, daß er nur ein einziges schwingendes System, an welchem alle magnetischen Kräfte (sowohl die des sog. Zittermagneten, welcher die Schwingungen hervorbringt, wie die des Spannungsrelais) angreifen, und einen einzigen beweglichen, mit dem schwingenden System verbundenen Kontakt besitzt, während der Gegenkontakt feststeht.

¹⁾ Vgl. Patentanmeldung S. 24 172 vom 20. Febr. 1907 und Zusatzanmeldung S. 25 056 vom 7. Sept. und 16. Nov. 1907, sowie Patentanmeldung S. 24 397 vom 30. März 1907.

Durch diese Anordnung wird der ganz erhebliche Vorteil erzielt, daß das schwingende System bei Belastungsänderungen außer den sehr kleinen Eigenschwingungen überhaupt keine meßbaren Wege zurückzulegen braucht, sondern daß dem schwingenden System gleichsam nur durch innere Zusatzspannungen ein Drehmoment erteilt wird, welches das Taktverhältnis $\frac{t_1}{t_2}$ im erforderlichen Maße beeinflusst. Die regelmäßigen Bewegungen des Regulators werden infolgedessen auch durch Belastungs- oder Spannungsänderungen nicht schädlich beeinflusst. Nur bei groben Spannungsänderungen, welche mehr als etwa 1 Proz. betragen, hören die Schwingungen eine Zeitlang völlig auf, der Kontakt bleibt geschlossen oder offen, bis die Spannung nahezu wieder hergestellt ist. Da aber der Gesamtausschlag des schwingenden Systems auf wenige Zehntel Millimeter begrenzt werden kann, so treten die normalen Schwingungen sofort und ganz von selbst wieder auf, sobald die Spannung dieses gestattet und erfordert. Die Bewegung der an sich nur kleinen Massen ist somit auf das denkbar kleinste Maß beschränkt.

Der Herstellung eines derartigen Regulators stellen sich aber erhebliche Schwierigkeiten entgegen, wenn die Bedingung gestellt wird, daß derselbe bei jeder beliebigen Belastung des Generators auf denselben Wert der Spannung regulieren soll. Nehmen wir bei einem solchen Regulator, bei dem die Zitterspule und die Spannungsspule beide an dem schwingenden System angreifen, an, daß die erstere, ähnlich wie in Fig. 53, von der Erregermaschine gespeist wird, so wird das mittlere Drehmoment Z , welches die Zitterspule auf das schwingende System ausübt, mit der Erregerspannung etwa quadratisch wachsen. Es ist ferner ersichtlich, daß (ähnlich wie bei einer elektrischen Klingel) bei einer Drehung des Systems unter der Kraftäußerung der Zitterspule Widerstand in den Erregerkreis eingeschaltet werden muß, um die Spannung der Erregermaschine und damit die Kraftäußerung der Zitterspule nach erfolgtem Anwachsen wieder zu verringern, da anderenfalls Schwingungen nicht auftreten könnten. Da aber bei zu hoher Spannung die Spannungsspule gleichfalls das Bestreben haben muß, den Widerstand des Erregerkreises zu vergrößern, so erhellt, daß das Drehmoment S der Spannungsspule gleichsinnig mit dem Drehmoment Z der Zitterspule sein muß.

Da nun den beiden Momenten S und Z durch eine Feder das Gleichgewicht gehalten wird, so ist

$$S + Z = \text{Constans} = C.$$

Der Regulator wird daher bei verschiedenen Belastungen, d. h. bei verschiedenen Erregerspannungen, nicht auf die gleiche Spannung regulieren können, sondern die jeweilige Spannung ist bestimmt durch die Beziehung

$$S = C - Z.$$

Da nun bei höherer Belastung die Erregerspannung und damit auch das mittlere Drehmoment Z der Zitterspule steigt, so wird die Spannung abnehmen; der Regulator wirkt daher unterkompoundierend, während eher das Gegenteil erwünscht wäre.

Diesem Übelstande kann nun durch folgende Mittel abgeholfen werden:

1. Man macht das Drehmoment S der Spannungsspule so groß, daß das Moment Z des Zittermagneten keine wesentliche Rückwirkung ausüben kann, oder man erzeugt die Schwingungen durch besondere, z. B. mechanische Hilfsmittel derart, daß die Schwingungen stets gleichartig und unabhängig von der Erregerspannung verlaufen.

Einen Regulator ersterer Art stellt Fig. 62 u. 63 dar.

2. Man läßt auf das schwingende System noch ein drittes kompensierendes Moment K im umgekehrten Drehsinne wie Z einwirken, welches in jedem Moment dem Mittelwert von Z gleich ist.

Während aber das tatsächlich von der Zitterspule ausgeübte Drehmoment periodisch um den Mittelwert Z schwankt, muß das Drehmoment K der Kompensationskraft möglichst frei von solchen Schwankungen sein, d. h. die Kompensationskraft, die natürlich am einfachsten gleichfalls durch die periodisch schwankende Erregerspannung erzeugt wird, muß durch geeignete Dämpfungsmittel auf einen möglichst konstanten Mittelwert mechanisch integriert werden. Für einen solchen Regulator gilt die Beziehung

$$\begin{aligned} S + Z - K &= C \\ S &= C + (K - Z). \end{aligned}$$

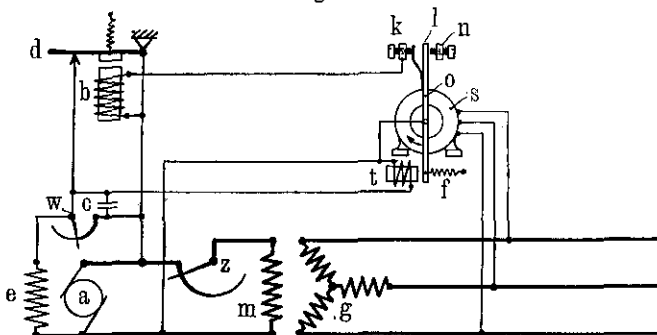
Wie die angezogenen Patentschriften zeigen, läßt sich diese Aufgabe durch sehr verschiedenartige Mittel lösen. Einen Apparat mit einer solchen Kompensationsvorrichtung zeigt Fig. 64 u. 65.

Es sei noch erwähnt, daß durch eine zu kräftige Kompensation auch eine Überkompoundierung des Generators erzielt werden kann.

Es mögen nunmehr die beiden von den Siemens-Schuckertwerken bisher praktisch ausgeführten Regulatoren Fig. 62 u. 63 ohne Kompensation und Fig. 64 u. 65 mit Kompensation näher erläutert werden:

Bei dem in Fig. 62 u. 63 dargestellten Regulator ist dem Spannungsrelais *s* die Form eines Drehstrommotors mit Kurzschlußanker gegeben. Damit aber der Anker nicht zu schwer ausfällt, ist das sonst bei Induktionsmotoren drehbare Rotoreisen fest angeordnet, während lediglich die aus einem dünnen Metallzylinder bestehende Kurzschlußwicklung beweglich ist. Dadurch

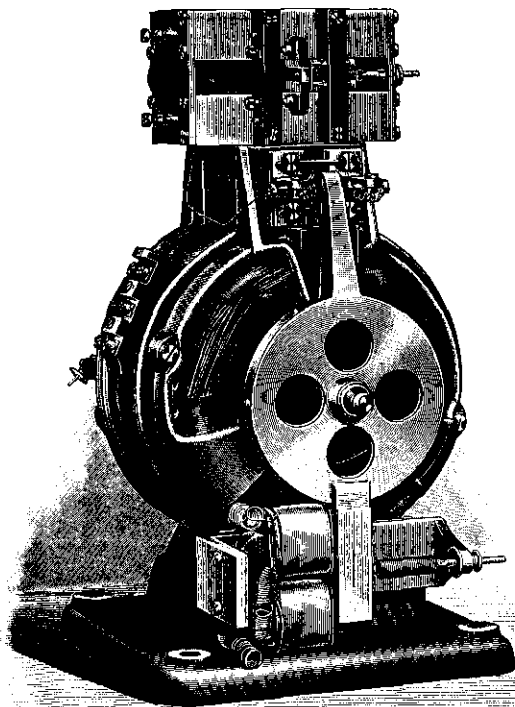
Fig. 62.



entwickelt das Spannungsrelais bei geringstem Gewicht und leichtester Beweglichkeit ein sehr starkes Drehmoment, so daß die Änderungen in der mittleren Zugkraft des Zittermagneten *t* nur in ganz geringem Maße die von dem Regulator konstant gehaltene Spannung beeinflussen. Die Verwendung eines Drehstrommotors als Spannungsrelais hat ferner den Vorteil, daß eine Dämpfungsvorrichtung für dasselbe nicht erforderlich ist. Das Zwischenrelais *b, d* ist bei diesem Apparat, wie Fig. 63 zeigt, oberhalb desselben montiert. Dasselbe besitzt (entgegen der schematischen Darstellung Fig. 62) zwei Kontaktstellen, welche hintereinander geschaltet sind und daher die Abschaltung der doppelten Energie gestatten als bei Benutzung nur einer Funkenstrecke. Die Konstruktion und Schaltung der Zwischenrelais ist in Fig. 64 und 65 b genauer dargestellt. In Fig. 62 ist der Kon-

takt d des Zwischenrelais absichtlich als Arbeitskontakt ausgeführt. Diese Anordnung würde ungünstig sein, da zur Inbetriebsetzung des Apparates und zur Einleitung der Schwingungen der Kontakt d zeitweise von Hand kurz geschlossen werden müßte, bis die Erregermaschine sich genügend erregt hat. Es ist daher

Fig. 63.



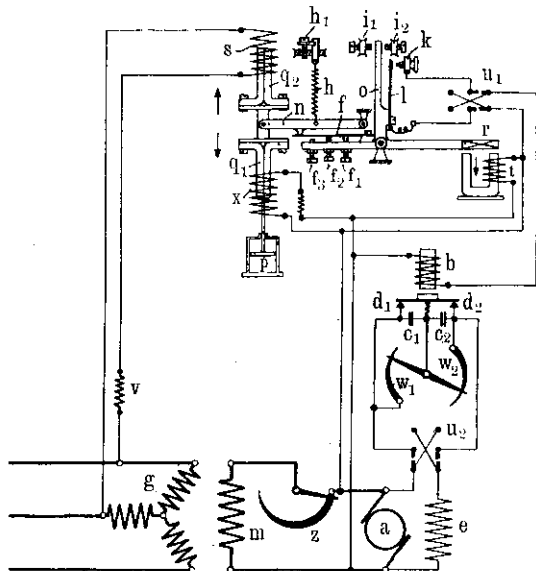
Schnellregulator der S.-S.-W. ohne Kompensation.

grundsätzlich die Anordnung so zu treffen, daß das Zwischenrelais im stromlosen Zustande seiner Wickelungen den Regulierwiderstand w kurz schließt, damit sich die Erregermaschine schnell selbst erregen kann. Dieses erfordert, daß der Kontakt d nicht, wie in Fig. 62, als Arbeitskontakt, sondern, wie in Fig. 60, als Ruhekontakt ausgebildet wird. Zu dem Zwecke müßte aber in

Fig. 62 statt des Kontaktes k des Hauptapparates der Kontakt n benutzt werden. Soll gleichwohl der Kontakt k als Hauptkontakt beibehalten werden, so kann man zu dem bei dem Tirrillregulator (Fig. 60) benutzten Hilfsmittel greifen und dem Zwischenrelais zwei gegeneinander arbeitende Wicklungen geben. In bezug auf die Funkenbildung des Hauptkontaktes bietet diese Anordnung aber keine wesentlichen Vorteile.

Bei dem in Fig. 64 u. 65 dargestellten, bereits in vielen Fällen mit bestem Erfolge angewandten Schnellregulator der

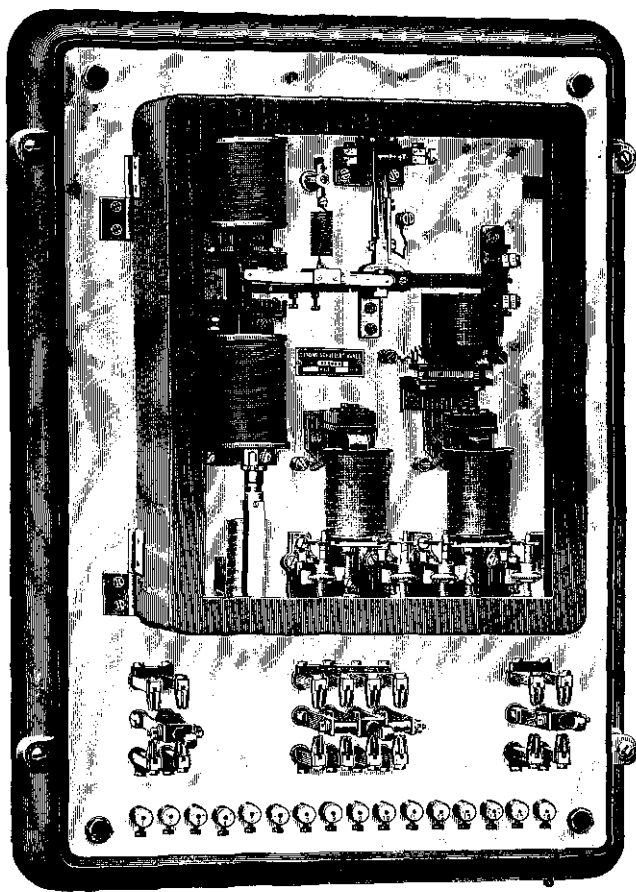
Fig. 64.



Siemens-Schuckertwerke besteht das schwingende System aus einem dreiarmligen Hebel o , dessen Gesamthub durch die Anschläge i_1, i_2 eng begrenzt ist. Auf dieses System wirken auf der rechten Seite der Zittermagnet t mit seinem Anker r , auf der linken Seite die fest miteinander verbundenen Anker q_1 und q_2 des Kompensationsmagneten x und des Spannungsrelais s . Diese beiden durch die Schwinge n geradlinig geführten Anker, deren Bewegung durch einen gemeinschaftlichen Ölkatarakt p gedämpft ist, wirken jedoch nicht direkt, sondern über die Feder f auf das

schwingende System *o*. Wegen der quadratisch mit der Erregerspannung wachsenden Zugkraft der Kompensationsspule war es auch hier erwünscht, der Feder eine mit ihrer Durchbiegung

Fig. 65 a.



Schnellregulator der S.-S.-W. mit Kompensation.

schnell zunehmende Steifigkeit zu geben. Diese Aufgabe ist durch die Anordnung von drei einstellbaren Druckschrauben f_1, f_2, f_3 unter Verwendung einer einzigen Blattfeder in einfachster Weise gelöst. Durch die Feder h wird das Gewicht der Anker q_1 und q_2

ausbalanciert, und durch Verstellung der Regulierschraube h_1 kann außerdem die konstant zu haltende Spannung verändert werden.

Auch bei diesem Regulator ist der Vorschaltwiderstand r des Spannungsrelais s so groß gehalten, daß die Spannung auch bei starker Änderung der Frequenz praktisch konstant gehalten wird.

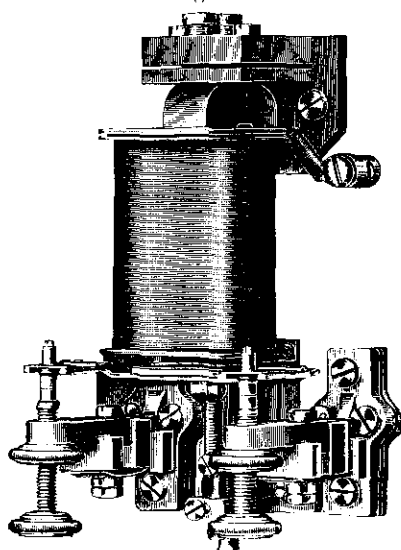
Das Zwischenrelais besitzt nur eine Wickelung b , die über die Kontakte k, l des schwingenden Systems von der Erregerspannung gespeist wird, und zwei als Ruhekontakte ausgebildete Kontakte d_1, d_2 zum Kurzschließen des in zwei Gruppen geteilten Erregerwiderstandes w_1, w_2 , zu denen die Kondensatoren c_1, c_2 zur Verringerung der Funkenbildung parallel geschaltet sind. Zwei Umschalter u_1, u_2 gestatten einen Wechsel der Stromrichtung an den Kontakten k, l und d_1, d_2 .

Die Apparate werden stets mit zwei Zwischenrelais ausgeführt (Fig. 65 a), auch wenn zum Betrieb nur ein Relais erforderlich ist. Das zweite Relais dient dann zur Reserve, und es ist

möglich, mittels eines besonderen — in Fig. 64 nicht dargestellten — Umschalters während des Betriebes, und ohne daß dabei die geringste Spannungsschwankung zu bemerken wäre, von einem Relais auf das andere überzuschalten.

Die Kontakträger sowohl des Hauptapparates wie des Zwischenrelais sind leicht zur Seite zu legen und gestatten daher eine sehr schnelle Auswechselung der Kontaktkörper, welche in entsprechende Hülsen hineingesteckt werden und in diesen nur durch eigene Federung gehalten werden; Schrauben sind dabei nicht zu lösen.

Fig. 65 b.



Zwischenrelais der S.-S.-W.

Die Achsen der Zwischenrelais, das in Fig. 65 a nochmals besonders dargestellt ist, werden durch zwei unter 90° gekreuzte Blattfedern¹⁾ gebildet, welche nicht wie drehbare Achsen einer Abnutzung unterworfen sind und im Gegensatz zu einfachen Blattfedern Kräfte in beliebiger Richtung aufnehmen können. Die Blattfedern dienen gleichzeitig als Stromzuführung zur Kontakttraverse. Durch die Teilung des Widerstandes in zwei Teile ist die Abschaltung der doppelten Energie möglich, und durch die Verbindung der Kontakttraverse mit dem Mittelpunkt des Erregerwiderstandes ist die gleichmäßige Verteilung der Energie auf die beiden Kontakte d_1 und d_2 gewährleistet²⁾.

Es sei noch erwähnt, daß die Regulatoren Fig. 58 und 65 ohne weiteres auch zur Verwendung in Gleichstromzentralen geeignet sind. Es muß aber in diesem Falle zur Erregung der Generatoren eine besondere Erregermaschine aufgestellt werden, da bei Eigenerröpfung die Spannung des Generators viel zu sehr pulsieren würde.

12. Leistungsfähigkeit der Regulatoren

§ 10 und 11, Anordnung für mehrere parallel arbeitende Generatoren.

Im § 8 war in einer Überschlagsrechnung ermittelt, daß die in § 10 und 11 beschriebenen Schnellregulatoren etwa nur $\frac{1}{100}$ der Erregerenergie, also etwa $\frac{1}{100} \times \frac{2}{100} = \frac{2}{10\,000}$ der Energie der Generatoren zu steuern haben. Nun kann man mit einem Zwischenrelais mit einer Funkenstrecke etwa 100 bis 200 Watt je nach der Stromstärke und mit einem Zwischenrelais mit zwei Funkenstrecken etwa 200 bis 400 Watt steuern, wobei unter der abgeschalteten Energie die Differenz der in dem Stromkreise auftretenden Energie bei Kurzschluß und Öffnung der Relaiskontakte verstanden werden soll. Unter diesen Annahmen kann man daher mit einem Zwischenrelais mit

¹⁾ D. R. G. M. 315 183 vom 22. August 1907 der Siemens-Schuckertwerke.

²⁾ D. R. G. M. 315 465 vom 24. August 1907 der Siemens-Schuckertwerke.

einer Funkenstrecke eine Generatorleistung von 500 bis 1000 KW
 zwei Funkenstrecken „ „ „ 1000 „ 2000 KW
 beherrschen.

Diese rohen Zahlen mögen nach einer Tabelle der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft über die noch von einem Relais (mit einer Funkenstrecke) unter verschiedenen Verhältnissen zu steuernden Nebenschlußstromstärken näher präzisiert werden. Nach der Erregerkurve (Fig. 2) ist bei Wechselstromgeneratoren eine Veränderung der Erregerspannung etwa im Verhältnis 1:2 erforderlich; um aber bei Vollast und Leerlauf noch einen Spannungsüberschuß für die Schnellregulierung zu besitzen, muß man den Schnellregulatoren im allgemeinen einen Regulierbereich von 1:3 geben. Unter Zugrundelegung dieses feststehenden Regulierverhältnisses ist die von einem Zwischenrelais zu steuernde Stromstärke einerseits von der Größe der Erregermaschine, andererseits von der Bauart der Maschine abhängig. Nach den Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft kann man bei Maschinen mit massiven Polen, welche den schnellen Austritt der Kraftlinien durch die auftretenden Wirbelströme hindern und daher die Funkenbildung an den Kontakten des Zwischenrelais verringern, doppelt so große Ströme bei gleicher Spannung schalten.

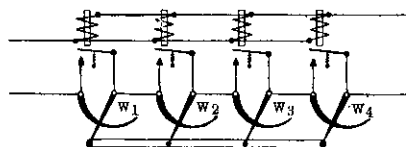
Die Erregermaschinen müssen ferner eine Steigerung der für den Generator erforderlichen maximalen Erregerspannung e um 15 Proz. zulassen. Rechnet man für eine schnell laufende Maschine unter Berücksichtigung dieser 15 proz. Übererregung 3 Proz. ihrer Energie für die eigene Erregung, so kann man danach die Leistung der Erregermaschine $\frac{100}{3} \frac{1}{1,15} = 22,5$ mal so groß als die Erregerenergie und die Leistung des Generators bei 2 Proz. Erregung $\frac{100}{2} \cdot 22,5 = 1125$ mal so groß als die Erregerenergie schätzen.

Die nachstehende Tabelle enthält die Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft über die von einem Relais (mit einer Funkenstrecke) noch zu steuernden Nebenschlußstromstärken und die damit schätzungsweise zu beherrschenden Generatorleistungen.

Erregerspannung e Volt	Erregermaschine mit							
	lamellierten Polen				massiven Polen			
	60	90	125	250	60	90	125	250
Nebenschlußstromstärke i Ampere, die von einem Relais bei $1,15 e$ regu- liert werden kann ¹⁾ . .	6	5	4	3	12	10	8	6
Erregerenergie $\frac{e \cdot i}{1000}$ KW .	0,36	0,45	0,50	0,75	0,72	0,90	1,00	1,50
Leistung der Erreger- maschine etwa $22,5 \frac{e \cdot i}{1000}$ KW	8,1	10,1	11,2	16,9	16,2	20,3	22,5	23,8
Leistung des Generators etwa $1125 \frac{e \cdot i}{1000}$ KW . .	405	506	563	844	810	1010	1125	1690

Sind die Erregerenergien größer, als für ein Relais bei der betreffenden Spannung zulässig ist, so muß man entsprechend Fig. 66 den Widerstand in mehrere gleiche Teile w_1, w_2, w_3, w_4 zerlegen und jeden Teil durch einen Relaiskontakt kurz schließen.

Fig. 66.



Dann kann nach den Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft die Stromstärke und somit auch die Kilowattzahl der Erregerenergie bei

2 Zwischenrelais um	50 Proz.
3 " "	100 "
4 " "	150 "

gesteigert werden.

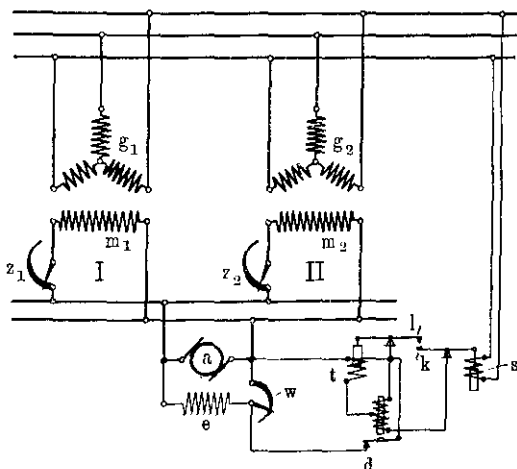
¹⁾ Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Bei Verwendung von Relais mit zwei Funkenstrecken in Hintereinanderschaltung, wie sie bei dem Schnellregulator der Siemens-Schuckertwerke verwandt sind, kann man somit die 1,5fache Energie, und bei Parallelschaltung zweier getrennter Stromkreise sogar die doppelte Energie steuern.

Die obigen, teils empirisch ermittelten, teils geschätzten Zahlen geben in dieser Beziehung einen guten Anhalt.

In den weitaus meisten Fällen wird man mit ein bis vier Zwischenrelais auskommen, die sich noch mit dem Hauptkontakt ohne übermäßige Funkenbildung steuern lassen. Sind mehr als

Fig. 67.



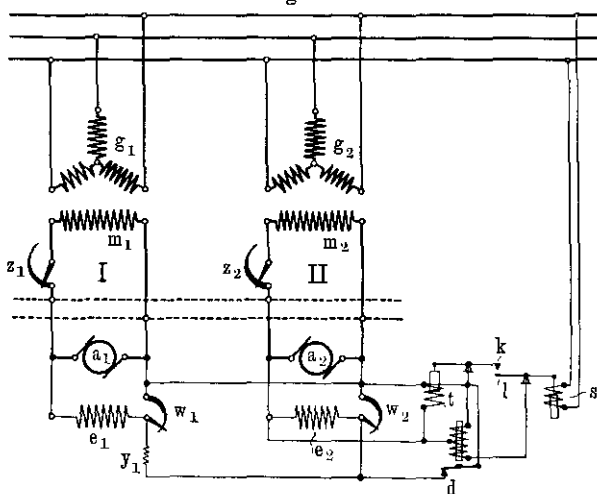
etwa sechs Zwischenrelais erforderlich, so würden bei direkter Steuerung die Kontakte des Hauptapparates zu sehr leiden; in solchen Fällen ordnet man daher ein oder mehrere Zwischenrelais erster Ordnung an und steuert durch diese die größere Zahl der Zwischenrelais zweiter Ordnung. Man könnte auch daran denken, eine Erregermaschine zweiter Ordnung einzubauen, um mit einem einzigen Zwischenrelais auszukommen, doch würden in diesem Falle die vielen hintereinander geschalteten Selbstinduktionen schädlich auf die Schnelligkeit der Regulierung einwirken und leicht ein Pendeln der Spannung verursachen.

Arbeiten mehrere Generatoren parallel auf dasselbe Netz, so

sind die im § 7 unter a bis d erwähnten Reguliermethoden sinn- gemäß auch hier zu verwenden.

Im Interesse der Einfachheit und Übersichtlichkeit wird man, sofern die Eigenschaften der Generatoren dieses gestatten, ent- weder entsprechend § 7 c nur eine einzige Maschine regulieren und die Erregung der übrigen auf einen Mittelwert einstellen oder wenigstens entsprechend § 7 b mit einem einzigen Regulator und einer Erregermaschine, die sämtliche Magneterregungen in Parallel- schaltung speist, auszukommen suchen (Fig. 67¹⁾).

Fig. 68.



Sind mehrere Erregermaschinen vorhanden, die gleichzeitig durch einen Regulator gesteuert werden müssen — ein Fall, der z. B. bei angebauten Erregermaschinen häufig vorkommt —, so sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die Erregermaschinen arbeiten getrennt auf ihre Generatoren (Fig. 68 u. 69; unter Fortfall der punktierten Linien).
2. Die Erregermaschinen arbeiten parallel auf ein Erregernetz, von dem aus die Magneterregungen der Generatoren in Parallel- schaltung gespeist werden (Fig. 68 u. 69, Erregernetz punktiert).

¹⁾ Den Fig. 67 bis 69 sind schematische Darstellungen des Tirrill- regulators der A. E. G., den Fig. 70 u. 74 solche des Schnellregulators der Siemens-Schuckertwerke zugrunde gelegt.

von d die Vollastspannungen von a_1 und a_2 auch gleich sind. Wohl aber ist dieses zu erreichen, wenn man in den Kurzschluß des Regulators w_1 derjenigen Maschinen, welche zu hohe Spannungen haben, einen Ausgleichswiderstand y_1 hineinlegt und diesen so lange verändert, bis die gewünschte Spannungsgleichheit erreicht ist¹⁾. Stimmen aber zwei Punkte der Spannungskurven überein — die Nullpunkte beider Kurven fallen überdies nahezu zusammen —, so ist zu erwarten, daß der ganze Verlauf der Spannungskurven für beliebige Taktverhältnisse (t_1/t_2) sich praktisch deckt.

Sind die Erregermaschinen zu groß, um sie durch ein Zwischenrelais steuern zu können, so kommt die Schaltung Fig. 69 in Frage, bei der für jede Erregermaschine ein Zwischenrelais angeordnet ist. Auch hier sind Ausgleichswiderstände (y) vorzusehen, um einen guten Parallelbetrieb zu ermöglichen.

Im Fall 2., in welchem mehrere Erregermaschinen parallel auf ein Erregernetz von veränderlicher Spannung arbeiten, kommen dieselben Schaltungen (Fig. 68 u. 69) in Frage. Man braucht sich nur die in diesen Figuren punktiert eingezeichneten Erregersammelschienen hinzuzudenken, auf welche die beiden Erregermaschinen a_1 , a_2 parallel arbeiten.

Die Schaltung Fig. 68, welche allerdings nur selten ausführbar sein wird, verdient in beiden Fällen (1. und 2.) den Vorzug vor Fig. 69, weil die Erregermaschinen durch die elektrische Kuppelung auch bei Störungen am Zwischenrelais stets gleiche Spannung geben werden, während bei der Schaltung nach Fig. 69 bei einer Störung an einem Zwischenrelais leicht Spannungsdifferenzen auftreten können. Im Falle 1. werden solche Spannungsunterschiede der Erregermaschinen Ausgleichströme zwischen den Generatoren, im Falle 2. zwischen den Erregermaschinen zur Folge haben. Da aber Gleichstrommaschinen im Parallelbetriebe wesentlich empfindlicher sind, so sollte man den Parallelbetrieb der Erregermaschinen nach Möglichkeit vermeiden oder, wenn er nicht zu umgehen ist, Mittel zur Verhütung solcher Störungen vorsehen.

Es wäre nun noch der dem § 7 d entsprechende Fall zu be-

¹⁾ Hierdurch würde allerdings die Spannungsregulierung bei Leerlauf wieder beeinflusst werden. Tatsächlich bilden die beiden Erregerwickelungen sowie die Regulier- und Ausgleichswiderstände eine Wheatstonesche Brücke, deren einer Zweig periodisch kurz geschlossen wird.

rücksichtigen, bei dem jede der parallel arbeitenden Maschinen oder Zentralen ihren eigenen Regulator erhalten muß. Diese Anordnung mehrerer Regulatoren wird man wegen der damit verbundenen Komplikationen nur anwenden, wenn die Verhältnisse durchaus dazu zwingen. Das kann der Fall sein, wenn die Charakteristiken oder die Zeitkonstanten der Maschinen sehr verschieden (z. B. langsam laufende und schnell laufende Maschinen) oder die letzteren wenig elastisch sind; ferner, wenn die Erregerspannungen sehr verschieden sind. Hauptsächlich aber tritt dieser Fall ein, wenn z. B. in größeren Hüttenwerken, Industrie- oder Bahnzentralen und solchen Elektrizitätswerken, die große Bezirke mit Energie versorgen, mehrere selbständige und gleichberechtigte Elektrizitätswerke in Parallelschaltung arbeiten. Die Regulatoren solcher parallel arbeitenden Maschinen oder Zentralen bedürfen, wie bereits in § 7 d und Fig. 45 u. 46 erläutert, besonderer Einrichtungen, um das Auftreten größerer wattloser Ausgleichströme zu vermeiden, während die nicht wattlose Komponente des Ausgleichstromes, welche den Synchronismus aufrecht erhält, indem sie das voreilende Polrad bremst, das nacheilende beschleunigt, durch sie nicht aufgehoben werden darf.

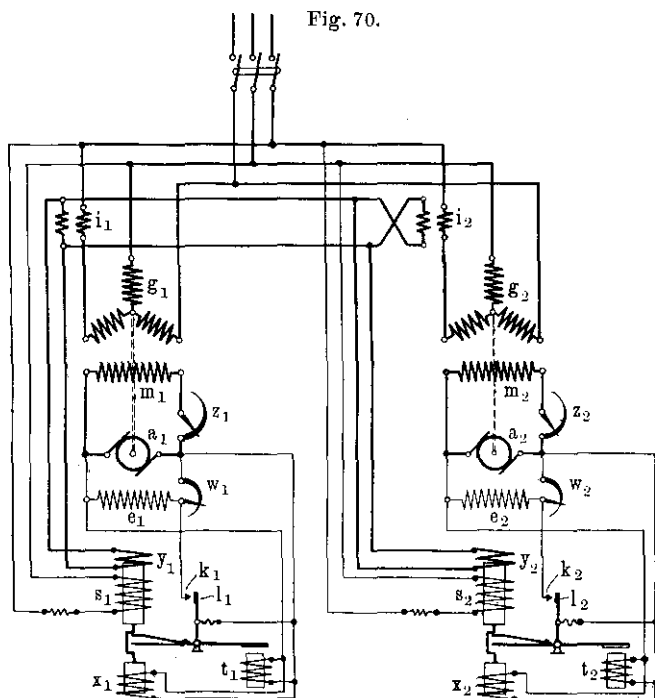
Die in Fig. 45 u. 46 dargestellten diesem Zwecke dienenden Einrichtungen gestatten jedoch noch eine wesentliche Vereinfachung, wenn man die (vektorielle) Differenzwirkung zweier Ströme, die den Grundgedanken jener Einrichtungen bilden, nicht durch die gleichzeitige Wirkung der Amperewindungen des Gesamtstromes und der Einzelströme in den zugehörigen Relais selbst, sondern vielmehr außerhalb derselben erzielt, indem man in besonderen stationären Einrichtungen die vektoriellen Stromdifferenzen, d. h. den Ausgleichströmen proportionale Ströme herstellt und diese in einer einzigen Zusatzspule in den Spannungsrelais magnetisch wirksam macht.

Da aber die magnetische Wirkung der Zusatzspule allein unabhängig von der Richtung und Phase des sie durchfließenden Ausgleichstromes sein würde, so muß die Grunderregung der Haupt- oder Spannungsspule, damit die Gesamtzugkraft beider Spulen nie Null wird, möglichst kräftig sein und ihre Phase mit der wattlosen Komponente des Ausgleichstromes zusammenfallen.

Eine solche Einrichtung, welche nach angestellten Versuchen unter Konstanthaltung der Spannung das Auftreten von Ausgleich-

strömen mit bestem Erfolge verhütet, zeigt Fig. 70¹⁾ für zwei Maschinen; die Anordnung für beliebig viele Maschinen ergibt sich daraus ohne weiteres, wenn man nicht, wie in Fig. 70, die Einzelströme der Maschinen miteinander, sondern den jeder einzelnen Maschine mit dem Gesamtstrom vergleicht.

In Fig. 70 sind die Sekundärwickelungen der beiden Stromtransformatoren i_1 und i_2 in einen geschlossenen Kreis und parallel



zu ihnen die Zusatzspulen y_1, y_2 geschaltet. In dem Vektordiagramm Fig. 71 bedeuten e_1, e_2, e_3 die Phasenspannungen, s die Amperewindungszahl der zwischen die Phasen e_1 und e_3 geschalteten Spannungsspule s_1 (Fig. 70), deren induktiver Widerstand gegenüber dem vorgeschalteten großen Ohmschen Widerstände vernachlässigt werden möge, i_i und i_{ii} die der Phase e_2 entsprechenden

¹⁾ Patentanmeldung S. 25 891 der Siemens-Schuckertwerke vom 10. Januar 1908.

Generatorströme, wobei zunächst induktionsfreie Netzbelastung vorausgesetzt werden möge. Die Ströme i_I und i_{II} fallen nur dann zusammen, wenn keine Ausgleichströme auftreten. Eilt aber i_I vor, i_{II} nach, so wird ihre vektorielle Differenz $z = i_I - i_{II}$ in den Zusatzspulen der Relais, und zwar in y_1 im positiven, in y_2 im negativen Sinne wirksam werden; z bildet daher unmittelbar ein Maß für die Phasenverschiebung zwischen i_I und i_{II} oder für den Ausgleichstrom. Je nach der Richtung oder Phase des Ausgleichstromes wird daher die Amperewindungszahl s der Spannungsspule durch diejenige der Zusatzspule $\pm z$ vermehrt oder vermindert, wodurch gleichzeitig die Erregung der vor-

Fig. 71.

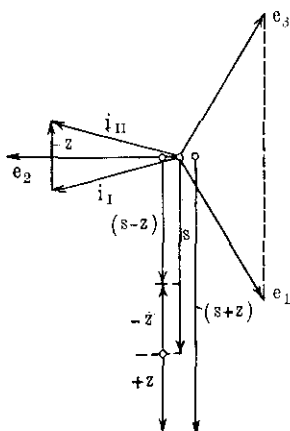


Fig. 72.

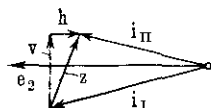
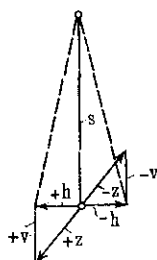


Fig. 73.



eilenden Maschine geschwächt, die der nacheilenden verstärkt wird in gleicher Weise, als wenn ihre Spannung zu hoch oder zu niedrig wäre.

Sind die Stromtransformatoren für die momentanen Leistungen der Maschinen nicht gut abgestimmt oder treten außer den wattofen auch nicht wattofe Ausgleichströme auf, so steht die vektorielle Differenz z nicht senkrecht auf dem Gesamtstrom (Fig. 72). Dieselbe läßt sich dann aber in zwei senkrechte Komponenten v und h zerlegen, und es ist nach Fig. 73 ersichtlich, daß von diesen beiden Komponenten nur die wattofe $\pm v$ die Gesamtamperewindungszahl des Spannungsrelais wesentlich be-

einflußt, während die nicht wattlose $\pm h$, wie erforderlich, nahezu ohne Einfluß ist.

Die in Fig. 70 dargestellte Anordnung bildet zwar eine sehr vollkommene Lösung der gestellten Aufgabe, mehrere parallel arbeitende Zentralen oder Generatoren auf konstante Spannung unter Vermeidung von Ausgleichströmen zu regulieren. Aber es ist nicht zu verkennen, daß z. B. die Verbindungsleitungen zwischen den Stromtransformatoren bei entfernten Zentralen eine sehr unangenehme Beigabe bilden, und daß bei Abschaltung einzelner Maschinen weitere Schwierigkeiten entstehen. Eine wesentlich einfachere Lösung der genannten Aufgabe, welche die einzelnen Zentralen ganz unabhängig voneinander macht, erhält man aber, wenn man die Bedingungen, welche der Regulator erfüllen soll, nicht ganz so scharf stellt. Es wird im allgemeinen genügen, wenn jede Zentrale einen Strom von konstanter Spannung, aber je nach den Betriebsverhältnissen einstellbarer Phasenverschiebung liefert. Dieses erscheint um so eher zulässig, als bei größeren Elektrizitätswerken die Tagesbelastungskurven meist genau bekannt sind, und da bei solchen Werken, bei denen die Phasenverschiebung rasch wechselt, wie bei Bahnzentralen, etwas geringere Ansprüche an die Konstanzhaltung der Spannung gestellt werden.

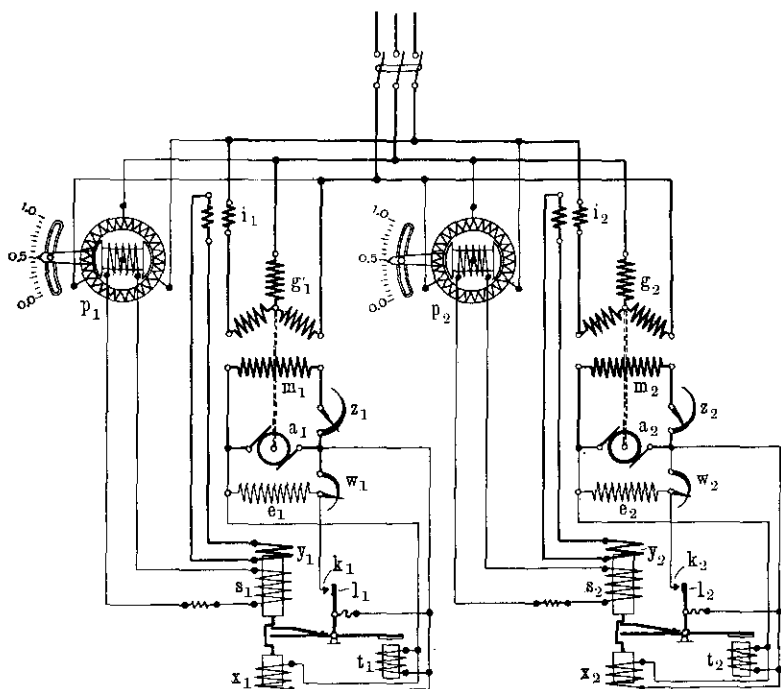
Die vorstehend skizzierte vereinfachte Aufgabe wird durch die in Fig. 74 dargestellte Anordnung des Spannungsrelais erfüllt¹⁾. Hierbei führt die Zusatzspule y_1 bzw. y_2 den Strom einer Phase des zugehörigen Generators, die Phase der Spannungsspule ist dagegen durch den Phasenumformer p_1 bzw. p_2 derart einstellbar, daß der Vektor s der Spannungsspule (Fig. 75) senkrecht zu dem in der betreffenden Betriebsperiode zu erwartenden Stromvektor i steht. Weicht nun der Strom von seiner normalen, durch die Einstellung des Phasenumformers gegebenen Phase BC ab und ändert sich in BC_1 oder BC_2 , so beeinflusst er wieder die Gesamt-Amperewindungszahl AC bzw. AC_1 , AC_2 des Spannungsrelais im jeweilig erforderlichen Sinne. In Fig. 74 ist eine Verschiebung des Spannungsvektors senkrecht zum Stromvektor angenommen, während es naturgemäßer wäre, den Spannungsvektor

¹⁾ Patentanmeldung der Siemens-Schuckertwerke vom 15. Februar 1908.

festzuhalten und den Stromvektor zu verdrehen. Dieses ist jedoch nur deshalb geschehen, weil die Verdrehung des Spannungsvektors mit einfacheren Mitteln zu erreichen ist als die des Stromvektors.

Würde in Fig. 75 der Stromvektor BC um 90° nach aufwärts, also AB entgegengesetzt gerichtet, verdreht werden, so würde die betreffende Maschine compoundiert sein; würde BC um 90° nach abwärts verdreht, so würde sie gegencompoundiert,

Fig. 74.

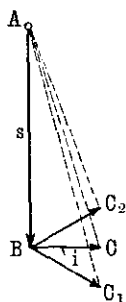


und bei einer Verdrehung um 180° würden Ausgleichströme nicht vermieden, sondern gerade erzeugt werden. Durch geeignete Verdrehung des Vektors BC gegen AB (oder umgekehrt), z. B. nach BC_2 , kann man daher außer der Vermeidung von Ausgleichströmen auch eine beliebige Compoundierung der ganzen Zentrale erzielen, ohne daß die Maschinen besondere Einrichtungen dafür zu besitzen brauchten.

Die in Fig. 74 dargestellte Einrichtung hatte zur Voraussetzung, daß die Regulatoren durch den einstellbaren Phasenumformer auf den richtigen $\cos \varphi$ eingestellt sind.

Würden nun aber sämtliche Zentralen ihre Regulatoren z. B. auf einen $\cos \varphi = 0,8$ eingestellt haben, während in der betreffenden Betriebszeit ein Strom mit einem $\cos \varphi$

Fig. 75.



$= 0,7$ gebraucht wird, so würde die Spannung etwas abfallen. Dieses könnte aber in jeder Zentrale durch ein Klingelsignal angezeigt werden und würde den Wärter veranlassen, den Phasenumformer auf einen niedrigeren Wert des $\cos \varphi$ einzustellen. Diese geringfügige Tätigkeit, die im Verhältnis zu der in größeren Zentralen sonst den Wärtern durch die Regulierung von Hand erwachsenden Arbeit kaum nennenswert ist, kann man wohl in Kauf nehmen, wenn man berücksichtigt, wie einfach sich dadurch die Regulier-

richtungen gestalten. Äußerstenfalls könnte man auch eine selbsttätige langsame Verstellung des Phasenumformers durch ein Spannungsrelais und einen Hilfsmotor anordnen.

Die Wirkungsweise der vorstehend beschriebenen Anordnung kommt darauf hinaus, die parallel arbeitenden Generatoren bzw. Zentralen elastisch nachgiebig zu machen.

13. Weitere Anwendungsgebiete der selbsttätigen Regulatoren und besonders der Schnellregulatoren.

Im vorstehenden ist nur auf die Verwendung der selbsttätigen Regulatoren zur Konstanthaltung der Spannung Rücksicht genommen. Bei der leichten Anpassungsfähigkeit der elektrischen Maschinen und Apparate an die verschiedensten Verwendungszwecke liegt es nahe, die selbsttätigen Regulatoren für die Konstanthaltung oder gesetzmäßige Änderung der verschiedenartigsten Zustände zu benutzen.

Bekannt ist die Verwendung besonders der trägen Regulatoren zur Konstanthaltung des Stromes oder der Leistung. Der erst neuerdings bekannt gewordene Schnellregulator scheint dazu berufen zu sein, dieses Arbeitsgebiet noch ganz erheblich zu erweitern. Mit seiner Hilfe wird es möglich sein, eine ganze Reihe

von Aufgaben, deren Lösung auf elektrodynamischem Wege ganz erhebliche Schwierigkeiten bietet, leicht zu lösen; denn er gestattet, die Regulierung unter raschster Überwindung der magnetischen Trägheiten direkt auf die Konstanzhaltung des in Frage kommenden Zustandes (der Spannung, der Stromstärke, der Tourenzahl, der Temperatur usw.) wirken zu lassen, ohne auf die einzelnen die Regulierung schädlich beeinflussenden Einwirkungen Rücksicht nehmen zu müssen.

Nachfolgend seien einige der wichtigsten Aufgaben, deren Lösung mit dem Schnellregulator möglich sein dürfte, zusammengestellt:

1. Konstanzhaltung der Spannung für Zentralen, Speisepunkte, Zugbeleuchtung usw.

2. Konstanzhaltung der Stromstärke für Bogenlampen in Serienschaltung, Scheinwerfer, sowie für Belastungswiderstände von Wasserturbinen mit ungenügender hydraulischer Regulierung.

3. Kompoundierung von Gleichstrom- und Drehstromgeneratoren.

4. Konstanzhaltung der Leistung (und Spannung) der Gleichstromgeneratoren in Bahnzentralen durch Vergrößerung der Pufferwirkung der parallel geschalteten Akkumulatorenbatterien (Ersatz der zurzeit hierfür mehrfach verwandten, ziemlich komplizierten Pirani-Maschinen ¹⁾).

5. Drehstrom-Gleichstrompufferung, welche die Verwendung von Energiespeichern in Drehstromanlagen gestatten würde ²⁾).

6. Energieausgleich mit Ilgner-Schwungrädern für Zentralen, Fördermaschinen usw.

7. Konstanzhaltung der Tourenzahl von Motoren trotz schwankender Belastung und Spannung; weitgehende Tourenregulierung (zum Antrieb von Papiermaschinen wird z. B. meist eine Regulierung 1:10 bis 1:20 bei $\pm \frac{1}{2}$ bis 1 Proz. Genauigkeit verlangt).

8. Regulierung der Auslaufwege bei Fördermaschinen derart, daß bei wechselnder positiver oder negativer Last die Förderschale stets genau an der Hängebank anhält.

Es ist allerdings zu bemerken, daß überall da, wo die Regulierung auf eine Änderung der Umdrehungszahl von Maschinen

¹⁾ Elektrotechnische Zeitschrift 1906, S. 255.

²⁾ Vgl. ebenda, S. 324 u. 1045.

wirken muß, sich Schwierigkeiten einstellen, da zur Beschleunigung und Verzögerung der Schwungmassen länger andauernde Stromänderungen erforderlich sind, welche leicht ein Überregulieren und Pendeln zur Folge haben.

Wenn somit der Schnellregulator auch imstande ist, viele Mängel in elektrischen Anlagen zu beseitigen, so möge auf der anderen Seite doch davor gewarnt werden, solche Maschinen oder Anlagen zu projektieren, deren Betrieb bei zeitweiser Ausschaltung des Regulators nicht durch Regulierung von Hand aufrecht erhalten werden könnte.

Der Schnellregulator soll uns ein erwünschtes Hilfsmittel sein, um den höchsten Ansprüchen gerecht zu werden und an Bedienungspersonal zu sparen, nicht aber soll er ein Ablaß für allerhand technische Sünden sein, die mit der ernstesten Selbsterziehung, welche die Elektrotechnik bisher beherrscht hat, nicht in Einklang zu bringen wären.

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Lehrbuch der Elektrotechnik.

Mit besonderer Berücksichtigung der
elektrischen Anlagen auf Schiffen.

Herausgegeben von

Dr. Johs. J. C. Müller,

Oberlehrer am Technikum der freien Hansestadt Bremen.

2. Auflage. Mit 425 eingedruckten Abbildungen. Preis geb. *M* 6.40,
gebunden in Leinwand *M* 7.—.

Elektrische Bahnen: Wohl selten ist das Erscheinen eines Lehrbuches der Elektrotechnik seitens der einschlägigen Fachkreise mit größerer Freude begrüßt worden, wie das obenstehende. Wenn das Werk in erster Linie als Handbuch für den elektrotechnischen Unterricht in den Oberklassen der Seemaschinen- und Maschinenbauschule des Technikums zu Bremen dienen soll, so wird es doch jedem Maschinisten, dem an Bord die Überwachung und Betriebsführung der elektrischen Anlagen obliegt, ein treuer Berater in allen an ihn heranretenden Fragen auf diesem Gebiete sein. Mit Rücksicht darauf, daß die Schüler, für die das Buch bestimmt ist, nur Anlagen zu überwachen und Reparaturen auszuführen haben, hat der Verfasser alle Einzelheiten der Konstruktion der elektrischen Maschinen ausfallen lassen und beschränkt sich auf eine kurze Darstellung der physikalischen Grundgesetze, die ausreicht, um auf ihr die Beschreibung der Wirkungsweise elektrischer Maschinen und Apparate aufzubauen. Für die Anlage des Buches war die Verteilung des Lehrstoffes maßgebend, der für den Unterricht in den Klassen des oben genannten Technikums vorgeschrieben ist. Im ersten Abschnitt bringt der Verfasser die physikalischen Grundgesetze, soweit die Kenntnis derselben zum Verständnis des in den folgenden Abschnitten behandelten Stoffes erforderlich ist. Im zweiten Abschnitt werden Wirkungsweise, Aufbau und Schaltungsarten der Gleichstrommaschinen besprochen, während der dritte Abschnitt von den Wechselströmen und der vierte von den galvanischen Elementen und Akkumulatoren handelt. Der fünfte Abschnitt befaßt sich auf 116 Seiten mit der elektrischen Beleuchtung. Glüh- und Bogenlampen werden in bezug auf Herstellung, Lichtausbeute, Schaltung und Stromverbrauch geschildert; es folgt dann eine eingehende Beschreibung der Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom sowie deren Antriebsmaschinen. Nachdem noch über die Behandlung der Dynamos bei der Inbetriebnahme, während des Betriebes und nach dem Abstellen sowie über vorkommende Störungen und deren Abhilfe gesprochen wird, wendet sich der Verfasser den elektrischen Leitungen und den Hilfsapparaten für dieselben zu. Sehr instruktiv wird die Verteilung der elektrischen Energie an Hand ausgeführter Anlagen auf Kriegs- und Handelsschiffen behandelt, wobei dem Lernenden die vorzüglich ausgeführten Stromverteilungspläne zum leichteren Verstehen zustatten kommen. Dieser Abschnitt schließt mit Erläuterungen über die Leitungen und gibt einige Methoden zur Messung des Isolationswiderstandes. Der letzte Abschnitt ist dem elektrischen Signalwesen an Bord der Dampfschiffe gewidmet. Der Verfasser beschreibt die elektrischen Wecker, Tableaueinrichtungen, Fernsignale sowie Maschinen-, Ruder- und Kessellelektrographen verschiedener Art, zum Schluß die in letzter Zeit vielfach an Bord aufgestellten Apparate für die telegraphische Fernsprechanlage einer kurzen Besprechung zu unterziehen. Das Buch kann nicht nur den Seemaschinisten, sondern jedem empfohlen werden, der sich über elektrische Anlagen auf Schiffen orientieren will.

Ausführliches Verlagsverzeichnis kostenlos.